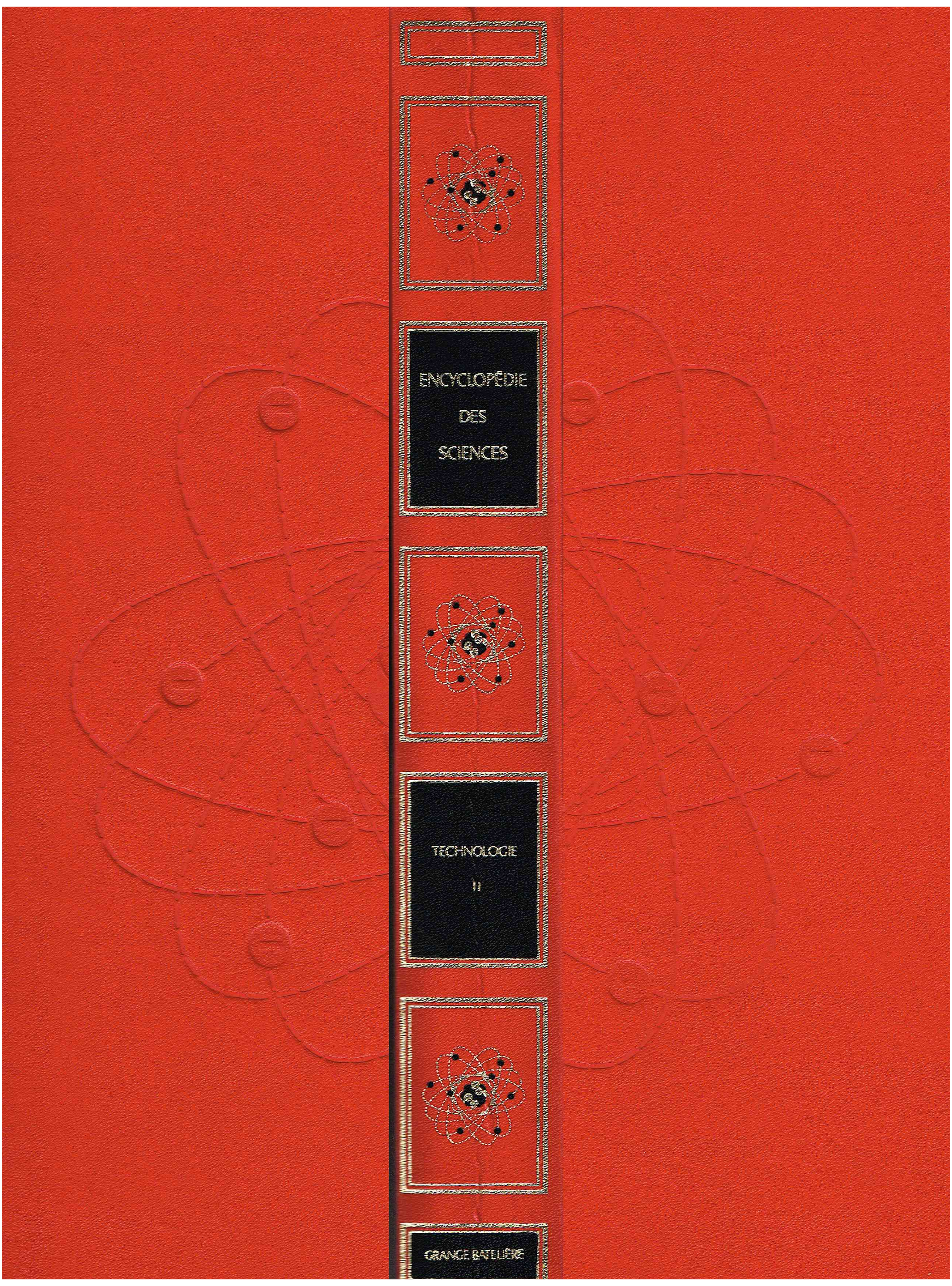

ENCYCLOPÉDIE
DES
SCIENCES
TECHNOLOGIE
II
GRANGE BATELIÈRE

# LEXIQUE DE TECHNOLOGIE (INFORMATION)

## SUPPLÉMENT AU VOLUME XVII DE LA GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

ABRÉVIATIONS

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *adj.* | adjectif | *n.* | nom | *syn.* | synonyme |
| *ex.* | exemple | *par ext.* | par extension | *v.* | verbe |

### A

**aberration.** *n.* Défaut dans la netteté ou dans la forme des images données par un système optique. On distingue les aberrations géométriques *(aberrations sphériques, courbure de champ, distorsion, coma* et *astigmatisme)*, résultant d'un défaut de stigmatisme du système, et les aberrations chromatiques, dues à la dispersion des lumières non chromatiques.

**accès.** *n.* En informatique, méthode d'écriture ou de lecture d'information contenue dans un fichier : accès séquentiel, indexé, séquentiel-indexé, aléatoire ou direct.

**accès direct mémoire** ou **DMA (Direct Memory Access).** Dispositif permettant l'écriture ou la lecture d'information en mémoire, réservé à un canal d'entrées-sorties.

**acquisition de données.** Mise en œuvre d'un processus de mesure destiné à recueillir des données.

**adressage.** *n.* En informatique, méthode d'accès par l'unité de commande à un opérande situé en mémoire centrale : adressage simple, immédiat, indirect, indexé, indirect-indexé.

**adresse.** *n.* En informatique, numéro d'ordre d'un mot ou d'un octet de la mémoire centrale.

**aérien.** *n.* Antenne de radar qui définit le volume de l'espace observé et concentre l'énergie de l'émetteur dans cette direction.

**agar-agar.** *n.* Mucilage fabriqué à partir d'une algue marine. Peut être utilisé comme support de culture bactériologique ou comme produit d'encollage.

**algorithme.** *n.* Processus d'élaboration d'un résultat par une suite bien définie d'opérations éventuellement répétitives.

**ambiophonie.** *n.* Reconstitution de l'espace sonore au moyen d'un grand nombre de haut-parleurs.

**amortie (onde).** Train d'onde d'amplitude décroissant rapidement, utilisé dans les débuts de la T.S.F. pour transmettre des signaux en morse.

**amplification.** *n.* Appliqué aux signaux électriques, ce terme désigne l'augmentation de l'amplitude apportée à la tension ou au courant, dans le but de rendre leur mesure plus aisée, par exemple.

**analogique.** *adj.* La représentation analogique d'une grandeur permet de suivre toutes ses variations, aussi petites soient-elles, de manière continue dans le temps, sur un seul support physique.

**anamorphose.** *n.* Procédé optique qui permet de réduire ou, au contraire, d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif ; le système optique proprement dit est appelé *anamorphoseur*.

**anémomètre.** *n.* Appareil de mesure de la vitesse des flux de fluides (gaz ou liquides).

**anti-halo.** *n.* Enduit filmique dorsal, qui absorbe les réflexions lumineuses parasites et qui assure la protection du support du film contre les rayures. Cette dorsale anti-halo est ramollie lors du pré-bain, puis totalement éliminée au cours du rinçage qui précède le bain chromogène.

**archives.** *n.* Ensemble de documents produits par un organisme public ou privé. Les archives constituent une source majeure d'information sur l'activité de cet organisme, c'est pourquoi leur conservation est importante. Les *archives de sécurité* sont la reproduction sur microformes des archives ou autres documents en vue de leur protection contre les incendies ou les dommages de guerre.

**arête.** *n.* Dans une image, zone de transition entre une partie sombre et une partie éclairée.

**arithmétique (unité).** Organe de l'ordinateur effectuant sous le contrôle de l'unité de commande les opérations arithmétiques et les conversions de type entier, réel.

**A.S.A. (American Standard Association).** Désigne l'indice de sensibilité d'une émulsion photographique : une émulsion de 400 A.S.A. est deux fois plus sensible qu'une émulsion de 200 A.S.A.

**assembleur.** *n.* 1° Langage mnémonique permettant une manipulation fidèle et plus aisée du langage machine. 2° Programme réalisant la traduction d'un texte écrit en assembleur en langage machine.

**audiofréquence** ou **audio.** *n.* S'applique aux fréquences dans la bande utilisée pour transmettre les sons.

**autocorrélation.** *n.* Nom donné à l'autocovariance centrée d'une fonction aléatoire stationnaire du second ordre.

**autocovariance.** *n.* Fonction de deux paramètres $t_1$ et $t_2$ ; espérance mathématique du produit $x(t_1)$. $x(t_2)$, $x(t)$ étant une fonction aléatoire.

**autocovariance centrée.** Autocovariance d'une fonction aléatoire centrée.

**automate.** *n.* Organe capable d'exécuter une fonction bien précise, d'une façon invariable, lorsqu'il est stimulé.

**autoradiographie.** *n.* Technique photographique apte à déceler et à déterminer la quantité de radionucléide présente dans l'objet à examiner.

**axe optique.** Axe de symétrie pour les propriétés optiques d'un cristal.

**azimutage.** *n.* Sur un magnétophone, opération de réglage de l'entrefer d'une tête magnétique, visant à obtenir sa perpendicularité avec la direction de défilement de la bande.

### B

**balayage électronique.** Technique permettant de commander la position du faisceau d'une antenne sans déplacer mécaniquement cette dernière. Le principe consiste à contrôler rapidement la phase des diverses sources élémentaires du réseau.

**bande bibliographique nationale.** Bande magnétique sur laquelle est enregistrée la description de tous les documents (livres, périodiques, documents graphiques, etc.) édités chaque année dans un pays. Les bandes magnétiques permettent l'exploitation de ces informations par ordinateur. L'échange des bandes entre pays permettra de réunir la totalité de l'information sur les documents édités dans le monde ; c'est ce qu'on appelle le *Contrôle Bibliographique Universel*.

**bande magnétique.** Support de mémoire de grande capacité constitué d'un film plastique recouvert d'une pellicule magnétisable.

**bande passante.** Fixe l'écart entre les fréquences maximum et minimum que laisse passer un amplificateur, par exemple.

**bandothèque.** *n.* Local où sont rangées les bandes magnétiques.

**banque de données.** Réunion d'un nombre important d'informations. Généralement, on utilise cette expression pour désigner un ensemble d'informations enregistrées sur bandes magnétiques et exploitables soit localement, soit à distance par l'intermédiaire d'un ordinateur.

**base de numération.** Nombre minimal de symboles utilisés pour représenter un entier quelconque ; l'entier s'exprime alors comme une somme pondérée des puissances de la base.

**bases de données.** Cette expression est souvent employée comme synonyme de *banque de données*. En France, elle désigne le plus souvent une banque de données recensant uniquement les données bibliographiques portant sur un sujet déterminé.

**batch (traitement par lot).** Méthode d'exploitation séquentielle des différents travaux confiés à un ordinateur; les ordres sont généralement lus sur des cartes perforées et les résultats écrits sur imprimante.

**bathycélérimétrie.** *n.* Courbe représentant la vitesse de propagation acoustique dans l'eau en fonction de la profondeur. On relève parfois aussi la bathythermie (courbe de température), que l'on peut ensuite facilement relier à la vitesse de propagation acoustique.

**bibliobus.** *n.* Autobus ou camion aménagé en bibliothèque et qui dessert les quartiers périphériques des villes ou les zones rurales lorsque la faible densité de population ne permet pas l'ouverture d'une bibliothèque.

**bibliographie.** *n.* Science dont l'objet est de retrouver la totalité des documents (notamment livres et articles de périodiques) concernant tel ou tel sujet, ce qui nécessite la consultation et donc la constitution d'instruments de travail tels que les répertoires bibliographiques, les bandes bibliographiques nationales, les bases de données (*voir* ces termes). Par assimilation, ce terme désigne souvent aussi les répertoires bibliographiques. Les *bibliographes* sont les bibliothécaires spécialisés dans cette discipline.

**bibliothécaire.** *n.* 1° Personne chargée de la gestion matérielle et scientifique de documents. 2° En informatique, programme chargé de la gestion d'une bibliothèque.

**bibliothéconomie.** *n.* Science dont l'objet est l'étude de l'ensemble des problèmes touchant à la communication et à la conservation des documents : problèmes de conservation matérielle, de classement, de constitution de catalogues, d'organisation des services en vue de la meilleure satisfaction des utilisateurs.

**bibliothèque.** *n.* 1° Organisme chargé de collecter et conserver des documents en vue de leur communication au public. C'est en fonction du public auquel elles sont destinées que les bibliothèques acquièrent leurs collections (livres, périodiques, documents iconographiques, audiovisuels, etc.), qui sont donc différentes selon qu'il s'agit de bibliothèques de lecture publique (*voir* cette expression) : municipale ou centrale de prêt, ou de bibliothèques d'étude et de recherche : nationale, universitaire ou spécialisée. 2° En informatique, on dit aussi *programmathèque :* usité en informatique dans le double sens de collection de programmes et de lieu de rangement de cette collection.

**bibliothèque centrale de prêt.** Bibliothèque créée dans un département français en vue de desservir les zones à faible densité de population. La bibliothèque centrale, le plus souvent située au chef-lieu du département, a généralement des annexes dans les petites villes et possède des bibliobus (*voir* ce terme) qui circulent dans les zones les moins peuplées.

**binaire.** *adj.* Utilisant la base de numération 2; symboles binaires usuels : 0 et 1.

**bit.** *n.* (abréviation de *binary digit*). 1° Chiffre binaire valant 0 ou 1. Plus petit élément d'information stockable dans une mémoire binaire. 2° Unité de mesure d'information lorsque le logarithme est à base 2 dans la formule de Shannon.

**blimp.** *n.* Caisson insonore dans lequel on enferme l'appareil de prise de vues dans son entier, ou plus simplement le mécanisme d'entraînement du film et les organes complémentaires susceptibles de produire ou de transmettre des bruits.

**bloc de déviation.** Ensemble de bobinages de fil de cuivre, enfilé sur le tube cathodique et destiné à provoquer des déviations du faisceau électronique interne pour générer un balayage de la couche luminescente.

**bloc mémoire.** Ensemble de mots dans une mémoire. La partition d'une mémoire en blocs mémoire permet de diviser la recherche d'une information en deux temps (recherche du bloc, puis de l'information dans le bloc).

**bloqueur.** *n.* Organe utilisé pour maintenir constante, par exemple, une grandeur analogique à convertir, à l'entrée d'un convertisseur analogique digital.

**B.L.U.** (abréviation de *bande latérale unique*). Principe d'émission énergétiquement économique, dans lequel la porteuse ainsi qu'une des deux bandes latérales de modulation sont supprimées.

**bootstrap.** *n.* Procédé d'initialisation des fonctions d'un ordinateur par le chargement en mémoire du moniteur.

**branchement.** *n.* On dit aussi *transfert* ou *rupture de séquence.* Notification à l'unité de commande de l'adresse de l'instruction suivante; un branchement peut être conditionnel s'il dépend de l'état de la machine au moment du transfert ou, sinon, inconditionnel.

**bruit.** *n.* Signal ne transportant pas d'information utile.

**bruit à bande étroite.** Fonction aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante sur un domaine $[-f_c, +f_c]$ et nulle ailleurs.

**bruit blanc.** Processus aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit la fréquence.

**bulles magnétiques.** Domaines cylindriques apparaissant dans un film mince, dont l'aimantation est opposée à celle du film. Éléments de base des mémoires dites à bulles magnétiques.

**bus.** *n.* Organe permettant de véhiculer les informations entre les différentes unités d'un ordinateur; dans le cas des systèmes dits « unibus », tous les échanges d'informations se font par un bus unique.

## C

**C.A.F.** (abréviation de *commande automatique de fréquence*). Dispositif électronique assurant l'accord exact du récepteur sur la fréquence de l'émetteur.

**C.A.G.** (abréviation de *commande automatique de gain*). Dispositif électronique chargé de maintenir constant le niveau d'écoute d'un récepteur radiophonique, et cela malgré les petites perturbations accidentelles de la réception.

**caméra.** *n.* Chambre noire munie d'un système optique et d'un mécanisme assurant l'entraînement intermittent d'un film.

**canal.** *n.* 1° Automate spécialisé dans les échanges d'informations entre l'ordinateur et un périphérique; il est indépendant de l'unité centrale. 2° Intervalle d'une bande de fréquences radioélectriques, déterminé par des accords internationaux.

**candela.** *n.* Unité d'intensité lumineuse (l'ancienne unité était la « bougie internationale »).

**capacité.** *n.* 1° En informatique, quantité d'information stockable dans une mémoire. Elle s'exprime en bits. 2° En communication, valeur maximale de l'information transmise par un canal. Ce maximum est pris par rapport aux probabilités des caractères d'entrée du canal.

**capacité (d'un condensateur).** Chiffre la valeur de la charge électrique Q d'un condensateur ayant à ses bornes une tension V par $Q = CV$.

**capteur.** *n.* Dispositif plus ou moins complexe utilisé pour « capter » une grandeur à mesurer. Comprend généralement un ou plusieurs transducteurs.

**caractère.** *n.* 1° Assemblage de bits dans les mémoires d'ordinateur. 2° Élément de l'alphabet d'un code. 3° Une des mesures permettant de préciser une forme.

**carte perforée.** Support d'information cartonné permettant le codage, par des perforations, de 80 caractères au plus.

**Cassegrain (antenne).** Antenne caractérisée par deux réflecteurs, un réflecteur principal constitué par un paraboloïde et un réflecteur secondaire constitué par un hyperboloïde.

**catalogage.** *n.* Opération de traitement du document qui consiste à rédiger une notice identifiant et décrivant celui-ci selon des normes précises. La réunion des notices catalographiques rendra possible la constitution des différents catalogues et répertoires bibliographiques (*voir* ces termes). Les moyens informatiques permettent maintenant un catalogage collectif partagé dans le cadre des réseaux de bibliothèques (*voir* cette expression).

**catalogue.** *n.* Document dont le support peut varier (livre, imprimé, fiches, microformes, ...) et qui rassemble des notices catalographiques. A la différence des répertoires bibliographiques, le catalogue localise les documents et correspond le plus souvent aux collections d'un établissement. Un catalogue peut avoir plusieurs *entrées* selon l'élément mis en vedette : auteur, titre, mot-clef ou mot-matière (le catalogue est dit *analytique*), indice correspondant à une classification (le catalogue est dit *systématique*).

**catalogue collectif.** Catalogue recensant les collections de plusieurs établissements. Les catalogues collectifs les plus répandus en France concernent les collections de périodiques. Le développement de l'informatique documentaire permet la constitution de catalogues collectifs de plus en plus importants, comme celui de l'Ohio College Library Center aux États-Unis, ou comme le projet de catalogue collectif national en France, en cours de réalisation par la Division de la coopération et de l'automatisation des bibliothèques.

**cavitation.** *n.* Phénomène qui se manifeste par l'apparition de bulles de vapeur dans un liquide lorsque la pression devient localement inférieure à la pression de vapeur saturante. Fréquente autour des hélices d'un navire, la cavitation limite le niveau sonore qui peut être émis avec un projecteur de sonar.

**cellulose.** *n.* Macromolécule végétale, constituant essentiel du bois, formée par une chaîne de motifs à structure hexagonale; sa formule brute peut s'écrire $(C_6H_{10}O_5)_n$ avec *n* pouvant atteindre 10 000.

**centrale (unité).** Dispositif d'un ordinateur regroupant l'unité de commande et l'unité arithmétique et logique.

**centre de documentation.** A l'origine, organisme destiné à recevoir les références des documents parus. Actuellement les centres possèdent également les documents eux-mêmes, si bien qu'il n'y a plus de différence entre eux et les bibliothèques spécialisées.

**centrée.** *adj.* Désigne une variable ou une fonction aléatoire à laquelle on a soustrait son espérance mathématique.

**chaîne de mesure.** Ensemble des dispositifs et instruments utilisés pour effectuer une mesure, du capteur jusqu'à l'indicateur de la mesure.

**chopper.** *n.* Mot utilisé couramment dans le jargon des électroniciens pour désigner un hacheur. Il s'agit ici de découper un signal électrique continu pour faciliter son amplification.

**chrominance.** *n.* En télévision en couleurs, le signal de chrominance est celui qui porte les informations de couleurs.

**chromogène.** *n.* ou *adj.* Les procédés à chromogènes permettent de renforcer ou de transformer en images colorées l'argent réduit constituant l'image. Le développement chromogène agit par copulation : développateur chromogène oxydé + coupleur → leuco-dérivé du colorant à former.

**cinémascope.** *n.* Procédé cinématographique de projection sur écran large, utilisant un dispositif anamorphoseur (*voir* anamorphose). Le cinémascope utilise une pellicule 35 mm à petites perforations carrées, et son format est de 2,55 (2,35 à la projection).

**circuit accordé.** Circuit électrique composé d'une self-inductance et d'un condensateur connectés en

parallèle, et dont l'impédance est maximale pour une fréquence particulière dite « d'accord ».

**circuits intégrés.** Circuits électriques pouvant être très complexes, fabriqués sur une microplaquette de silicium (quelques millimètres carrés). Comme éléments d'ordinateur, ils présentent un avantage considérable de compacité et de fiabilité sur les dispositifs électroniques.

**classification.** *n.* 1° Expression par un système de l'ensemble de la connaissance et fondé sur la distinction de *classes :* ensemble d'objets, d'êtres, d'idées, etc., possédant une caractéristique commune. Les multiples classifications permettent de décrire le contenu des documents et de classer ces descriptions dans un ordre logique, systématique, constituant des catalogues ou des répertoires qui en faciliteront la recherche. A condition d'être simplifiée, une classification peut servir de base au classement matériel des documents. 2° Opération classique de reconnaissance des formes ayant pour but de décider à quel ensemble une forme nouvelle appartient (les ensembles sont supposés définis antérieurement.

**Clayden (effet).** Effet photographique qui se caractérise par la désensibilisation d'une couche sensible, due à une exposition très courte à une énergie élevée (ou à une exposition à des rayons X).

**clutter.** *n.* Ensemble d'échos ponctuels, de phases quelconques, contenus dans le volume de confusion du radar.

**coalescence.** *n.* Technique, appelée aussi « clustering », permettant de former des groupes similaires de formes dans un ensemble de formes mesurées. Cela permet de créer des classes quand celles-ci ne sont pas imposées *a priori.*

**codage.** *n.* Opération réalisant la transcription de messages écrits dans un alphabet en un autre alphabet, selon les règles d'un code.

**codage de Shannon-Fano.** Codage, proposé par Shannon et Fano, tel qu'au message $m_i$ de probabilité $p\ (m_i)$ est associé un mot-code de longueur $n_i$

avec $\log_2 \frac{1}{p\ (m_i)} \leqslant n_i \leqslant \log_2 \frac{1}{p\ (m_i)} + 1$

**codage par blocs.** Technique de codage telle qu'un mot-code est associé à une suite de messages de la source de longueur $k$ au lieu d'être simplement associé à un message.

**code.** *n.* 1° Règle d'équivalence entre deux ensembles de messages. 2° Représentation sur plusieurs bits (6 à 8) des différents caractères imprimables ou non; les plus usités sont : ASCII, EBCDIC et Hollerith, représentation sur 4 bits des symboles décimaux : BCD.

**code de Bose-Chauduri-Hocquenghem.** Code cyclique généralisateur du code de Hamming.

**code à contrôle de parité.** Code dont les mots-codes ont $(n + m)$ chiffres, $n$ porteurs d'information, et $m$ utilisés pour contrôler la partie précédente (ce sont les chiffres de parité).

**code cyclique.** Code détecteur correcteur d'erreurs, fermé pour l'opération de permutation linéaire des chiffres (tout permuté d'un mot-code est un mot-code).

**code détecteur correcteur d'erreurs.** Code ayant la possibilité de détecter et/ou de corriger des erreurs de transmission.

**code de Fire.** Code cyclique correcteur de paquets d'erreurs de longueur supérieure à deux.

**code de Gray** ou **code réfléchi.** Code cyclique tel que le passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur ne modifie qu'un chiffre du nombre de départ.

**code de Hamming.** Code à contrôle de parité détectant et corrigeant les erreurs simples.

**code de Huffmann.** Code optimum tel que : *a*) les messages les plus probables ont les mots-codes les plus courts; *b*) les messages de même probabilité ont des mots-codes de même longueur.

**codeur.** *n.* Organe réalisant une opération de codage.

**codeur de position.** Convertisseur analogique digital assurant la conversion d'une position ou d'un mouvement.

**codeur de tension.** Convertisseur analogique digital réalisant la conversion d'une tension électrique.

**coercitif.** *adj.* Se dit du champ magnétique nécessaire pour annuler l'intensité d'aimantation dans un matériau initialement saturé.

**cohéreur.** *n.* Le cohéreur, inventé par Branly, permettait la détection des ondes électromagnétiques amorties (communications en morse).

**colorants sensibilisateurs.** Composés chimiques qui, inclus au sein d'une émulsion, permettent d'obtenir une sensibilité spectrale couvrant tout le domaine visible.

**colorimétrie.** *n.* Décrit et mesure la sensation colorée que perçoit un œil moyen, en fonction de la composition spectrale de la lumière qu'il reçoit.

**commande (unité de).** Partie de l'ordinateur chargée du repérage et du décodage des instructions d'un programme; elle fournit à l'unité arithmétique et logique ses opérations et ses opérandes.

**compilateur.** *n.* Programme effectuant la traduction d'un texte rédigé dans un langage évolué (ALGOL, FORTRAN, COBOL, etc.) en langage-machine.

**compteur de programme.** Registre spécialisé désignant l'adresse en mémoire de la prochaine instruction à exécuter. Il est mis à jour à chaque instruction.

**condenseur.** *n.* Système optique, placé à l'intérieur d'un appareil de projection et destiné à concentrer le flux lumineux sur le plan du film. Un condenseur est généralement formé de deux lentilles épaisses plan-convexes, ou d'une combinaison de miroirs sphériques ou elliptiques.

**console.** *n.* On dit aussi *machine à écrire* ou *télétype.* La console d'un ordinateur se compose d'un clavier et d'un écran ou/et d'un système d'impression sur papier; la console « maîtresse » sert à l'opérateur pour communiquer ses ordres à la machine; les autres consoles éventuelles du système servent aux usagers, moins prioritaires.

**contraste.** *n.* Le contraste d'une reproduction photographique, désigné par la lettre $\gamma$, est représenté par la pente de la courbe caractéristique. Le contraste indique le degré de la variation dans les images, soit de la couleur, soit de la luminosité.

**contretype.** *n.* Reproduction par contact d'un film négatif ou positif; sert à l'élaboration de positifs intermédiaires, puis de négatifs intermédiaires, pour le tirage d'une série importante de copies.

**conversationnel.** *adj.* Qualificatif d'un programme ou d'un système prenant ses ordres et donnant ses réponses à l'aide d'une console, par opposition à ceux utilisant lecteur de carte et imprimante.

**conversion.** *n.* (Dans le sens de numérisation.) En saisie des données, signifie transformation de la représentation d'une grandeur. *Ex. :* conversion analogique-digital.

**convertisseur analogique digital.** Périphérique d'un ordinateur chargé de convertir des tensions en mots binaires et réciproquement; ce périphérique est utilisé pour le traitement de signal et le pilotage d'unités analogiques (oscilloscope, tables traçantes, etc.).

**corps d'épreuve.** Élément intermédiaire dont on mesure la déformation quand il est soumis à une force dont on ne peut mesurer directement la valeur. Connaissant les propriétés mécaniques du corps d'épreuve, on peut relier sa déformation à la force qui lui est appliquée et obtenir ainsi une mesure de cette force.

**corps de Galois.** En mathématiques, corps dont le nombre d'éléments est fini.

**corps noir.** Corps idéal absorbant complètement toutes les radiations, quelle que soit leur longueur d'onde.

**corrélateur.** *n.* Appareil réalisant le calcul d'une fonction de corrélation.

**couchage.** *n.* Traitement de surface du papier, réalisé par le dépôt d'une matière minérale pulvérulente en présence d'un agent adhésif. Le couchage rend la surface de la feuille plus régulière et diminue sa porosité.

**couloir d'impression.** Partie constitutive de la caméra, le couloir d'impression est une pièce métallique traversée en son centre par une fenêtre dont les dimensions correspondent à celles de l'image.

**couple thermo-électrique (thermocouple).** Ensemble de deux conducteurs métalliques différents soudés à leurs extrémités. Lorsque les deux soudures sont à des températures différentes, il existe entre elles une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des fils et de la température des soudures.

**coupleurs.** *n.* Composés chimiques chargés de former les images constituées par des colorants. Chacun de ces coupleurs est incorporé dans sa couche propre et permet d'obtenir des colorants cyan, magenta ou jaune.

**courbe caractéristique.** Graphique sensitométrique représentant l'évolution de la densité d'un photogramme en fonction de l'exposition.

**courbe de sensibilité.** La courbe de sensibilité de l'œil correspond à la courbe de luminance visuelle de sources monochromatiques dont la luminance énergétique est la même. Cette courbe de sensibilité présente un maximum dans les jaunes en vision photopique (diurne), qui tend à se déplacer dans les bleus en vision scotopique (nocturne).

**croix de Malte.** Pièce métallique composée de quatre secteurs circulaires séparés par des rainures orthogonales, qui assure l'entraînement intermittent du film dans la plupart des projecteurs.

**crosscorrélation.** Nom donné à la crosscovariance centrée de deux fonctions aléatoires stationnaires du second ordre.

**crosscovariance.** *n.* Fonction de deux paramètres $t_1$, $t_2$, espérance mathématique du produit de deux fonctions aléatoires $x\ (t)$, $y\ (t)$ prises respectivement pour les valeurs $t_1$ et $t_2$ du paramètre $t$.

**crosscovariance centrée.** Crosscovariance de deux fonctions aléatoires centrées.

**cycle mémoire.** Opération de lecture et d'écriture dans une mémoire d'ordinateur.

## D

**débit d'information.** Pour les mémoires à débit séquentiel, quantité d'information lue ou écrite par unité de temps.

**décimal.** *adj.* Utilisant la base de numération 10; symboles usuels : 0, ..., 9.

**décit.** *n.* Unité de mesure de l'information lorsqu'on utilise les logarithmes décimaux dans la formule de Shannon.

**décodeur.** *n.* Organe assurant un travail inverse de celui d'un codeur (*voir* ce terme).

**décodeur stéréophonique.** Partie du récepteur en modulation de fréquence, chargée de séparer les canaux gauche et droit contenus dans le signal « multiplex » issu du *discriminateur.*

**découpage.** *n.* Représentation écrite d'un film; le découpage est fractionné en séquences et en plans; il s'accompagne de la continuité dialoguée et des indications techniques du metteur en scène.

**décrémenter.** *v.* Retrancher 1 à un nombre.

**décryptable de manière unique.** Propriété d'un code tel que, à toute séquence quelconque de caractères du code, corresponde une suite unique de messages de la source.

**défibrage.** *n.* Traitement mécanique qui sépare les fibres de la pâte lors de la fabrication de la pâte à papier.

**définition.** *n.* Qualité de netteté d'un cliché photographique; elle résulte du pouvoir séparateur de l'objectif ainsi que du pouvoir de résolution de la pellicule.

**délignification.** *n.* Ensemble des réactions qui détruisent et solubilisent la lignine du bois.

**densité.** *n.* Terme sensitométrique servant à définir la plus ou moins grande opacité d'un échantillon photographique. La densité correspond au logarithme décimal de l'opacité.

**densité cross-spectrale de puissance.** Transformée de Fourier de la fonction de crosscorrélation centrée de deux fonctions aléatoires stationnaires.

**densité spectrale de puissance.** Transformée de Fourier de l'autocorrélation d'une fonction aléatoire stationnaire du second ordre.

**densitomètre.** *n.* Appareil servant à analyser et à mesurer les différentes plages de densité d'un cliché photographique.

**dépôt légal.** Obligation du dépôt d'un certain nombre d'exemplaires de chaque document (livre, périodique, carte, disque, film, en général tous supports sonores ou iconographiques) par l'éditeur ou l'imprimeur. Ce dépôt permet le recensement de l'ensemble de la production d'un pays ainsi que la protection des droits des auteurs.

**détection.** *n.* Permet de retrouver le signal dans l'onde modulée. Plus généralement, permet de déceler la présence d'un signal déterminé dans un ensemble d'ondes de caractéristiques différentes.

**développement.** *n.* Première étape des traitements photographiques. Elle consiste à réduire entièrement en argent les cristaux insolés qui portent une image latente dans un temps le plus court possible, sans modifier les cristaux non insolés; c'est cette réaction qui forme les colorants des images.

**dicop.** *n.* Système de visée qui permet de contrôler indifféremment l'image par visée électronique ou par visée reflex, le passage d'un système de visée à l'autre s'effectuant par simple escamotage d'un miroir à 45°.

**digital.** *adj.* Une représentation digitale d'une grandeur utilise des combinaisons de 0 et de 1 dans la forme binaire. La représentation digitale nécessite une quantification de la grandeur en un nombre de niveaux dépendant du nombre $n$ de digits utilisés ($2^n$ en binaire).

**D.I.N. (Deutsche Industrie Normen).** Méthode particulière pour la détermination de la sensibilité des couches photographiques. Les degrés D.I.N., contrairement aux degrés A.S.A., sont en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$.

**dipôle de Maxwell.** Petit élément linéaire de circuit électrique, de dimension très inférieure à la longueur d'onde du courant alternatif qui le parcourt.

**direct (accès).** *Voir* mode d'accès aléatoire.

**directivité.** *n.* Capacité de certains transducteurs d'émettre ou de recevoir dans une ou plusieurs directions privilégiées.

**discriminateur.** *n.* Partie du récepteur radio en modulation de fréquence, chargée de la transformation du signal MF en signal modulé en amplitude, puis en signal basse fréquence.

**dispatching.** *n.* Service chargé, dans les centres de calcul, de la restitution à l'utilisateur des états ou listings sortis par l'ordinateur.

**disque.** *n.* Support magnétique d'information se présentant sous forme d'un disque ou d'un empilement de plusieurs disques. *Unité de disques :* dispositif assurant la lecture et l'écriture sur le disque, et par l'ordinateur, des informations; suivant la disposition des têtes de lecture, on parlera de disques à têtes fixes ou mobiles. Les disques souples de dimensions moindres sont surtout utilisés sur les mini-systèmes.

**disque magnétique.** Mémoire constituée d'un disque recouvert de matériau magnétique défilant devant des têtes magnétiques.

**distance de Hamming.** Nombre de chiffres différents de deux nombres binaires.

**distorsion.** *n.* Déformation d'un signal, introduite lors de sa reproduction. La *distorsion d'amplitude* est la conséquence de la non-linéarité entre l'entrée et la sortie du système de reproduction. La *distorsion de fréquence* traduit la dépendance en fréquence de cette relation.

**diversité de fréquence.** Technique selon laquelle un radar émet à la même puissance qu'un radar monofréquence, mais en la divisant également sur deux fréquences d'émission $f_1$ et $f_2$ : elle annule les fluctuations de la cible en faisant apparaître l'équivalent d'une cible de fréquence constante.

**donnée.** *n.* Valeur numérique représentant la valeur d'une grandeur mesurée.

**Doppler (effet).** Il existe un écart de fréquence $\Delta f$ entre la fréquence émise $f_E$ et la fréquence signal $f_s$ reçue lorsque la cible est animée d'une vitesse V. $\Delta f$ est appelée *fréquence Doppler*. Pour un émetteur fixe, $\Delta f$ est égal à $2 f_E \frac{V}{c}$, où $c$ est la vitesse de la lumière.

**duplexeur.** *n.* Commutateur électronique qui ouvre la voie au signal radar émis dans le sens émetteur-antenne et la ferme dans le sens émetteur-récepteur. Il effectue le travail inverse pour le signal reçu.

## E

**échantillonnage.** *n.* Opération consistant à ne prendre la valeur d'un signal continu qu'à certains instants appelés instants d'échantillonnage. Cette opération est nécessaire pour permettre des actions commandées par calculateur numérique.

**éclairement.** *n.* Quotient du flux lumineux reçu par un élément de surface, par l'aire de cet élément : $E = \frac{d\Phi}{dA}$. L'unité d'éclairement est le lux.

**écran de visualisation.** Partie d'une console ne servant qu'en sortie des résultats sous forme de caractères (écran alphanumérique) ou de courbes point par point (écran graphique).

**édition de liens.** Phase du traitement d'un programme consistant en l'ajout de références et de modules non connus du compilateur.

**effet thermo-électronique.** Phénomène physique se produisant pour certaines substances, qui leur permet d'émettre des électrons quand elles sont chauffées.

**efficacité.** *n.* Pour un code, rapport de la longueur moyenne minimale possible pour les mots-codes à la longueur moyenne des mots-codes du code étudié.

**élasticité.** *n.* Propriété qu'a un corps de retrouver ses dimensions initiales quand cesse la force ou la contrainte qui le déforme.

**émittance.** *n.* Flux lumineux émis par une source dans tout l'espace avant, par unité de surface.

**émulsion photographique.** Mélange de matériaux photosensibles, constitué de cristaux d'halogénure d'argent, de gélatine et de composés chimiques (colorants sensibilisateurs, ...), et servant à l'enregistrement des images et à leur fixation définitive.

**enluminure.** *n.* Illustration très colorée de livres ou de parchemins médiévaux. Les enluminures ont précédé la peinture sur bois ou sur toile qui, à l'origine, en a repris les thèmes.

**entrée-sortie.** Échange d'informations entre le calculateur et ses périphériques; une entrée désigne un transfert d'un périphérique vers l'ordinateur; une sortie désigne un transfert de l'ordinateur vers un périphérique. *Unité d'entrée-sortie :* organe chargé d'effectuer ces transferts.

**entropie.** *n.* En informatique, information moyenne fournie par une source.

**épitaxie.** *n.* Procédé technologique permettant de faire croître un monocristal à partir d'un support monocristallin.

**ergodicité.** *n.* Propriété de fonctions aléatoires où les moyennes temporelles sont identiques aux moyennes statistiques.

**étalonnage.** *n.* En photographie, opération de laboratoire précédant le tirage et qui consiste à déterminer l'intensité de lumière ainsi que les corrections de couleur à apporter au négatif afin d'obtenir des images positives correctes en densité et en contraste.

**état d'imprimante** ou **liste,** ou **listing.** Nom donné à une feuille d'imprimante contenant des résultats fournis par un ordinateur.

**évolué (langage).** Langage théoriquement indépendant de la structure des ordinateurs; il permet l'écriture, par exemple, de formules mathématiques sans que l'utilisateur ait à se préoccuper des ordres en langage machine correspondants. Les principaux langages évolués sont : ALGOL, FORTRAN, APL et LISP pour les applications scientifiques, et PL 1 et COBOL pour les applications de gestion.

**extensométrie.** *n.* Métrologie appliquée à la mesure des déformations. Les jauges de contrainte sont souvent appelées aussi jauges d'extensométrie.

**extracteur.** *n.* Étage final d'un sonar sophistiqué permettant, par comparaison entre plusieurs émissions successives, de simplifier la tâche de l'opérateur en ne retenant que les cibles intéressantes, d'en calculer avec précision la trajectoire et la vitesse et éventuellement de commander un système d'orientation d'armes.

## F

**fac-similé.** *n.* Dans la presse, transmission de pages de journal par ligne téléphonique pour qu'elles soient imprimées dans un atelier éloigné de l'imprimerie de composition.

**fading.** *n.* Terme désignant les fluctuations périodiques du niveau de réception, sensibles dans certains cas de mauvaises transmissions de l'onde radioélectrique.

**feeder.** *n.* Ligne assurant la transmission du courant haute fréquence entre l'émetteur et l'antenne.

**ferrite.** *n.* Matériau en céramique ou fritté, présentant une forte susceptibilité magnétique ainsi qu'une faible *hystérésis*, employé dans les circuits magnétiques à haute fréquence (antennes miniatures des récepteurs portatifs, noyaux de bobinage, ...).

**fiabilité.** *n.* Degré de confiance que l'on peut accorder à un dispositif.

**fichier.** *n.* Catalogue établi sur fiches, chaque document étant représenté par une ou plusieurs fiches selon le nombre d'entrées choisi.

**filtrage adapté.** Filtrage électronique centré sur la fréquence d'émission (pour un sonar) et permettant de réduire les bruits de provenances diverses (bruit marin, bruit électronique) pour ne garder que le signal utile.

**filtre.** *n.* Lame transparente, en verre ou en gélatine, qui absorbe les radiations lumineuses correspondant à la couleur complémentaire de la sienne propre.

**filtre linéaire.** En théorie du signal, système linéaire à une entrée et une sortie, destiné par exemple à isoler une fréquence.

**firmware.** *n.* Terme désignant la partie du logiciel très dépendante du matériel.

**fixage.** *n.* Opération permettant d'éliminer les sels d'argent devenus inutiles après le développement de l'image photographique. Le *fixateur* est constitué d'une solution d'hyposulfite de sodium ou d'ammonium.

**fluorescence.** *n.* Rayonnement émis, avec un spectre caractéristique de la cible, par un corps excité par un rayonnement incident (rayons X par exemple).

**flux lumineux.** Produit du flux énergétique (puissance transportée) par le coefficient de sensibilité de l'œil pour une longueur d'onde donnée; il se mesure en lumens.

**focale.** *n.* et *adj.* La distance focale d'un objectif est la distance qui sépare son centre optique de son foyer image.

**fonction aléatoire.** Fonction d'un paramètre (généralement le temps), dont la réalisation dépend du tirage d'une expérience.

**fonction aléatoire du second ordre.** Fonction aléatoire dont le second moment existe.

**fonction intensité.** Fonction à deux arguments $x_1y_1$, représentative de l'intensité lumineuse au point de coordonnées ($x$, $y$) du plan d'une image. Si l'image est colorée, la fonction intensité est un vecteur à trois composantes, l'une pour le bleu, l'autre pour le rouge et la troisième pour le vert.

**format.** *n.* Le format d'un film correspond à la largeur de la pellicule. Le format d'image, indépendant de celui du film, est caractérisé par le rapport de la largeur de l'image à sa hauteur : $F_{image} = \frac{L}{H}$.

**formation de voies.** Appareillage électronique d'un sonar, permettant d'analyser simultanément les échos venant de toutes les directions.

**forme.** *n.* Nom donné à un ensemble de caractères précisant une configuration particulière (portion de signal, partie d'image, ...).

**Foucault (courants de).** Courants induits dans un matériau soumis à un champ magnétique variable.

## G

**gain d'une antenne.** Rapport entre l'énergie émise par une antenne dans une direction donnée et celle qui serait émise dans cette direction par une antenne omnidirectionnelle ou isotrope.

**galène.** *n.* Minerai de sulfure de plomb dont une variété présente des propriétés analogues à celles d'une diode électronique, au niveau du contact avec une aiguille métallique. Le cristal de galène assurait la détection de la modulation d'amplitude dans beaucoup des premiers postes de T.S.F.

**gammagraphie.** *n.* Méthode de contrôle fondée sur l'affaiblissement de l'intensité des rayons $\gamma$ par la matière qu'ils traversent.

**gélatine.** *n.* Protéine constituant le liant des couches sensibles en photographie.

**génération d'ordinateurs.** Période de l'histoire des ordinateurs caractérisée par un certain degré de l'évolution de la technologie. On distingue actuellement quatre générations, de la naissance de l'ordinateur à nos jours.

**germanium.** *n.* Élément semi-conducteur, qui a été le plus couramment utilisé au début de l'ère des transistors. De moins en moins utilisé.

**grammage.** *n.* Se définit comme la masse de papier par unité de surface. Il est donné en grammes par mètre carré.

**grandeur.** *n.* Paramètre physique, chimique, biologique, etc., utilisé pour décrire, seul ou avec d'autres, l'état d'un système, essentiellement représentable par un nombre associé à un nom d'unité. *Ex. :* 32 V, 47 °C.

## H

**Hall (effet).** Champ électrique induit par l'action d'un champ magnétique sur des particules chargées en mouvement.

**Hard Copy Unit.** Dispositif permettant la photocopie automatique d'un écran de visualisation.

**hardware (matériel).** Désigne l'ensemble de tous les dispositifs physiques de l'ordinateur — le corps — par opposition au *software* (logiciel) qui désigne l'ensemble de tous les programmes — la matière grise.

**haute fidélité** (abréviation anglaise : **Hi-Fi**). Label de qualité décerné à un matériel de reproduction sonore répondant à certaines normes (normes Siere, DIN 45500, ...).

**héliogravure.** *n.* Procédé d'impression « en creux ». Des alvéoles de profondeur inégale, ménagés par l'attaque de l'acide sur un cylindre de cuivre, reçoivent l'encre qui est appliquée sur le papier.

**hémicelluloses.** *n.* Macromolécules végétales, voisines de la cellulose, de degré de polymérisation moins élevé. Les motifs principaux qui constituent les chaînes sont le glucose, le mannose et le xylose.

**hémiédrie holoaxe.** Caractérise le rapport entre les symétries des faces du cristal et celles du réseau des atomes ou des molécules qui le constituent.

**hexadécimal.** *adj.* Utilisant la base de numération 16; symboles utilisés : 0, ..., 9, A, ..., F.

**humidité (d'un papier).** Teneur en eau du papier.

**hydrophone.** *n.* Capteur de pression qui transforme les ondes sonores sous-marines qu'il reçoit en courant ou en tension électrique. C'est l'analogue, dans l'eau, du microphone.

**hygrométrie.** *n.* Métrologie appliquée à l'humidité de l'air.

**hyperfocale.** *n.* et *adj.* Lorsqu'on effectue la mise au point sur la distance hyperfocale, la profondeur de champ s'étend d'une distance égale à la moitié de l'hyperfocale jusqu'à l'infini. L'hyperfocale est définie à l'aide de la tolérance de netteté linéaire $\rho$ par :

$$\overline{OP} = \frac{f^2}{\rho N}$$

**hypergonar.** *n.* Dispositif optique anamorphoseur mis au point en 1928 par le professeur Chrétien; il se présentait sous la forme d'un système optique afocal constitué de deux lentilles convergentes et divergentes.

**hystérésis.** *n.* Phénomène traduisant la dépendance de l'intensité d'aimantation, non seulement par rapport au champ appliqué mais aussi par rapport aux états d'aimantation antérieurs.

## I - J

**image binaire.** Image obtenue après représentation d'une image à l'aide d'une fonction intensité ne prenant que deux valeurs 1 et 0 (par exemple, pour le noir et le blanc).

**image latente.** Enregistrement invisible de l'image photographique lors de l'exposition. L'image latente, qui se forme à la surface ou à l'intérieur des cristaux d'halogénure d'argent, se présente sous la forme de nombreuses agglomérations d'atomes d'argent.

**impédance.** *n.* Généralisation de la notion de résistance pour les circuits utilisés en alternatif, pour tenir compte des déphasages introduits par les inductances ou les condensateurs.

**imprimante.** *n.* Dispositif permettant de frapper simultanément tous les caractères d'une ligne sur une ou plusieurs feuilles de papier. Commandée par ordinateur, une imprimante peut écrire de plusieurs centaines à plusieurs milliers de lignes par minute.

**incrémenter.** *v.* Ajouter 1 à un nombre.

**indexation.** *n.* En informatique, mode d'adressage utilisant un registre d'index pour stocker l'*adresse* d'un opérande.

**indexé (accès).** Méthode d'organisation d'un fichier d'ordinateur; les adresses sur le support des enregistrements du fichier sont consignées dans un tableau. Pour accéder à un enregistrement, on explore le tableau d'index, puis on traite directement l'information sur le support à l'adresse indiquée. *Accès séquentiel indexé :* le tableau d'index ne contient pas toutes les adresses; on recherche donc l'adresse de l'enregistrement précédant celui recherché, et on explore le fichier à partir de celui-ci; cette organisation suppose que les enregistrements sont ordonnés séquentiellement.

**indicateur panoramique (P.P.I., Panoramic Plane Indicator).** Système de visualisation des échos radar sur un écran analogue à celui d'un oscilloscope. La tension de wehnelt est modulée par le signal reçu par le radar après détection et amplification.

**indirection.** *n.* Mode d'adressage où l'opérande est désigné par son adresse et non par sa valeur.

**induction magnétique.** Grandeur caractérisant l'action du champ magnétique sur la matière, égale au produit du champ par la perméabilité du matériau.

**inégalité de Kraft.** Condition d'existence d'un code instantané.

**information.** *n.* Éléments pouvant être transmis par un signal. La formalisation mathématique de ce concept a été réalisée par Shannon et porte le nom de *Théorie de l'information.*

**information mutuelle.** Étant donné deux ensembles de messages X et Y, différence de l'entropie de X (H (X)) avec l'entropie conditionnelle de X par Y (H (X/Y)). Cette quantité caractérise l'information échangée entre X et Y.

**instantané.** *adj.* Propriété d'un code tel qu'aucun mot-code n'est préfixe d'un autre.

**instrumentation.** *n.* Description des instruments et des techniques de mesure.

**intelligence artificielle.** Expression désignant en fait plusieurs techniques : reconnaissance des formes, traitement d'images, théorie de la décision, démonstration de théorèmes, ...

**intensité d'aimantation.** Appelée également *aimantation* ou *polarisation magnétique*, c'est le quotient du moment magnétique induit dans la matière par le champ magnétique inducteur.

**intercepteur.** *n.* Sonar spécial permettant la détection rapide et sûre ainsi que la mesure des paramètres des émissions sonar adverses (émission de torpilles, identification de bateaux).

**interface.** *n.* Dans un ordinateur, dispositif de communication et de traduction entre les périphériques et l'unité centrale.

**ionosphère.** *n.* Région de la haute atmosphère s'étendant approximativement entre 60 et 600 km d'altitude et dont les propriétés électriques permettent la réflexion des ondes radioélectriques.

**jauge de contrainte.** Élément ou dispositif utilisé pour mesurer une force, une pression ou une déformation.

**justification.** *n.* Terme d'imprimerie; répartition des espaces entre les mots, de manière à obtenir une dimension unique pour toutes les lignes d'un même texte.

## K - L

**Kerr (cellule de).** Dispositif électro-optique permettant de modifier la polarisation de la lumière, par l'action d'un champ électrique sur un liquide.

**kraft.** *n.* Qualifie le procédé de délignification chimique, réalisé à chaud par une solution contenant de la soude et du sulfure de sodium.

**Lambert (loi de).** On dit d'une source qu'elle rayonne suivant la loi de Lambert si sa luminance est égale dans toutes les directions : on a donc, entre son excitance M et sa luminance L, la relation $M = \pi L$.

**lampe à arc.** Lampe de projection dans laquelle la décharge est entretenue entre deux bâtonnets de charbon fortement minéralisé.

**lampe à décharge.** Lampe dans laquelle la décharge a lieu entre deux électrodes à l'intérieur d'une ampoule à haute pression gazeuse.

**lampe à incandescence.** Lampe dans laquelle le rayonnement lumineux provient de l'incandescence d'un filament de tungstène traversé par un courant électrique.

**langage machine.** Ensemble de toutes les configurations de chiffres binaires constituant les codes des instructions exécutables par la machine.

**lecteur de cartes, de rubans.** Périphérique spécialisé dans la transmission à l'ordinateur des informations codées sur les cartes perforées ou les rubans papier.

**lecture publique.** Expression qui désigne l'ensemble des actions et méthodes bibliothéconomiques (*voir* bibliothéconomie) destinées à favoriser l'accès du grand public à la lecture et à l'information.

**lecture sonore.** L'ensemble de lecture sonore, composé d'une source lumineuse, d'un système optique condenseur, d'une fente de lecture et d'une cellule photo-électrique, traduit les variations de densité photographique en variations de courant électrique.

**lentille électrostatique.** Dispositif d'électrodes auxquelles est appliqué un champ électrique destiné à dévier la trajectoire des électrons de manière à focaliser le faisceau. Par analogie avec les lentilles qui dévient les faisceaux lumineux.

**light-pen.** *n.* Crayon lumineux permettant la désignation sur un écran d'un caractère ou d'un point.

**ligne à retard.** Circuit utilisé pour allonger le temps de propagation d'un signal (donc le retarder). Les lignes à retard peuvent être de natures très différentes : à composants électroniques, électrostrictives, par ultrasons, etc.

**lignine.** *n.* Composé donnant au bois sa rigidité; sa formule brute la plus représentative est $C_9H_9O_2$—$OCH_3$. La molécule contient un cycle aromatique, mais sa structure est loin d'être connue avec précision.

**liste** ou **listing.** *n. Syn.* d'état d'imprimante.

**littérature souterraine.** Ensemble des documents circulant hors commerce et donc très difficiles à recenser, tels que rapports, études, préprints (*voir* ce terme).

**logiciel.** *n.* Ensemble de programmes écrits pour une machine *(software)* ou une application *(package)*.

**logique (unité).** Organe de l'ordinateur effectuant, sous le contrôle de l'unité de commande, les opérations logiques (ET, OU, NON, etc.).

**L.S.I. (Large Scale Integration).** Nom donné à la technologie réalisant sur une faible surface de support de très nombreux composants électroniques (exemple d'une mémoire de 2 024 bits sur une pastille de quelques millimètres carrés).

**luminance.** *n.* 1° Quotient de l'intensité lumineuse émise par une surface, par l'aire de cette surface pour un observateur éloigné. 2° En télévision en couleurs, le signal de luminance traduit les variations de brillance de l'image. 3° Le facteur de luminance d'un écran cinématographique est défini par le rapport des luminances que présentent dans l'axe de projection respectivement l'écran et un échantillon blanc étalon appliqué parallèlement à l'écran en son centre.

**lumination.** *n.* Appelée aussi *éclat apparent*, la lumination est le produit de l'éclairement par la durée d'exposition.

**lumen.** *n.* Unité de flux lumineux.

**luminophore.** *n.* Désigne la couche déposée à l'intérieur du tube cathodique et qui est composée de substances émettant sur l'écran une lumière de longueur d'onde spécifique sous l'impact des électrons.

**lux.** *n.* Unité d'éclairement. Un lux correspond à un flux d'un lumen éclairant une surface de 1 $m^2$.

## M

**machine à écrire.** En informatique, *syn.* de console.

**magnétorésistance.** *n.* Effet physique provoquant une variation de résistance par l'action d'un champ magnétique.

**magnétoscope.** *n.* Appareil d'enregistrement sur bande magnétique des images de télévision et du son associé.

**magnétoscopie.** *n.* Méthode de contrôle qui étudie les défauts d'un matériau grâce aux déformations des lignes de force magnétiques.

**masse spécifique.** Masse d'un corps de volume unité.

**matériel.** *n. Syn.* de hardware.

**matrice syndrome.** Matrice de contrôle d'un code à contrôle de parité dont la connaissance permet de détecter et/ou de corriger des erreurs.

**media.** *n.* Supports. Ce terme est généralement employé pour désigner les nouveaux supports de l'information, par opposition au papier et autres supports anciens ou traditionnels (papyrus, parchemin, tissus, bois, pierre...). Parmi ces nouveaux supports, citons les images fixes : photographies, diapositives, transparents; les images animées : films, bandes vidéo, montages audio-visuels; les supports sonores : disques, cassettes, bandes magnétiques; les microsupports (*voir* microformes).

**mémoire.** *n.* Dans un ordinateur, organe de conservation de l'information sous forme binaire. L'élément de base est un organe à deux états stables, l'un conservant le « 1 », l'autre le « 0 ».

**mémoire centrale.** Dispositif contenant, au moment de son exécution, les instructions et les données d'un programme.

**mémoire cinématique.** Mémoire non adressable, où l'information est stockée aussi longtemps que désiré.

**mémoire dynamique.** Mémoire où l'information doit être périodiquement régénérée.

**mémoire de masse.** Support d'information magnétique (disques, bandes magnétiques, tambours et feuillets).

**mémoire morte.** Mémoire à lecture seule.

**mémoire MOS.** Mémoire dont la cellule de base est constituée de semi-conducteurs MOS. Ces mémoires, atteignant une forte densité d'intégration, sont de plus en plus utilisées.

**mémoire permanente.** Mémoire où l'information ne peut être modifiée par une opération d'écriture.

**mémoire PROM. (Programmable Read Only Memory).** Mémoire morte que l'utilisateur peut coder lui-même.

**mémoire RAM. (Random Access Memory).** Mémoire vive adressable.

**mémoire ROM. (Read Only Memory).** Mémoire morte dont l'écriture est assurée par le fabricant.

**mémoire statique.** Mémoire adressable où l'information est stockée aussi longtemps que désiré.

**mémoire vive.** Mémoire où l'information peut être modifiée.

**métrologie.** *n.* Science de la mesure. Elle étudie les méthodes de mesure et évalue leur précision ainsi que la technologie et les performances des instruments effectuant les mesures.

**microforme** ou **microsupport.** *n.* Ce terme désigne les microfilms et microfiches, c'est-à-dire les documents reproduits sur films à un format très réduit, ce qui permet un gain considérable en surface de stockage et en coûts de duplication.

**micro-informatique.** *n.* Étude et réalisation de dispositifs miniaturisés.

**micro-ordinateur.** *n.* Ordinateur élaboré autour d'un microprocesseur.

**microprocesseur.** *n.* Circuit monolithique réalisant les fonctions d'une unité centrale.

**mire.** *n.* Ensemble de signaux utilisés en télévision pour régler les circuits des récepteurs. La mire apparaît sur l'écran sous des formes variées comportant des figures circulaires et des barres alternées de largeurs différentes, plus ou moins noires ou de couleurs diverses.

**miroir dichroïque.** Miroir dont le taux de réflexion varie avec la longueur d'onde de la lumière qu'il reçoit.

**mode d'accès aléatoire.** Mode de lecture d'une mémoire tel que le temps d'accès est constant, quelle que soit l'adresse de stockage. Ce terme est utilisé dans le cas de mémoires adressables.

**mode d'accès séquentiel.** Mode de lecture des mémoires non adressables. Le temps d'accès dépend de l'endroit où l'information est stockée. Ce mode d'accès est, par exemple, celui des mémoires à ruban magnétique.

**modulateur-démodulateur (MODEM).** Organe chargé de la conversion des signaux entre un ordinateur et une ligne de transmission.

**modulation.** *n.* Variation, suivant une loi imposée dans le temps, d'une caractéristique d'un signal électrique (amplitude, phase, fréquence).

**module.** *n.* Automate ou programme autonome réalisant une fonction élémentaire précise.

**module objet.** En informatique, résultat de la compilation d'un texte, ne pouvant être exécuté qu'après l'*édition des liens*.

**module piézo-électrique.** Rapport $k$ entre la charge électrique Q résultant de l'application d'une force F sur les deux faces d'une plaquette cristalline : $Q = kF$.

**moniteur.** *n.* Ensemble des modules d'un système informatique assurant la prise en compte des programmes et leur enchaînement.

**monochromatique.** *adj.* La couleur de la lumière étant liée à sa longueur d'onde ($\lambda$) ou à sa fréquence ($f$) : $\lambda = c/f$, monochromatique est synonyme de « composé d'une seule fréquence ».

**monoprogrammation.** *n.* Utilisation d'un ordinateur pour un seul programme; l'exécution d'un programme $P_2$ ne peut commencer que lorsque le programme $P_1$ est terminé.

**monopulse (poursuite angulaire par).** Procédé qui consiste à effectuer des mesures angulaires en traitant chaque impulsion de retour de la cible par une antenne à directivité multiple.

**MOS. (Metal Oxyde Semiconductor).** Transistor à effet de champ, où la grille est isolée du canal par une couche isolante. Cet élément est actuellement très utilisé dans les mémoires.

**mot.** *n.* Dans une mémoire, assemblage de bits permettant de représenter une entité (code d'instruction, valeur numérique,...). Actuellement, les longueurs des mots sont fréquemment des multiples d'un octet.

**MTI. (Moving Target Indicator)** ou **VCM. (Visualisation des Cibles Mobiles).** Procédé fondé sur la séparation de deux cibles par leurs fré-

quences Doppler et qui permet de distinguer une cible mobile dans un milieu d'échos fixes.

**multiplexage.** *n.* Méthode permettant l'utilisation d'une même ligne pour transmettre simultanément plusieurs informations.

**multiprogrammation.** *n.* Utilisation d'un ordinateur par plusieurs programmes; le programme $P_2$ s'exécute lorsque le programme $P_1$ est momentanément suspendu.

**myriamétrique.** *adj.* Dont la longueur s'exprime en dizaines de kilomètres; les ondes myriamétriques étaient très employées aux débuts de la radiodiffusion.

## N

**nat.** *n.* Unité de mesure de l'information lorsqu'on utilise les logarithmes naturels dans la formule de Shannon.

**NTSC.** Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs, « National Television System Committee ».

## O

**objectif.** *n.* L'objectif photographique (ou cinématographique) est un système optique convergent, constitué d'un assemblage de lentilles, qui assure la restitution correcte de l'image d'un objet sur la surface sensible.

**obturateur.** *n.* La fonction d'un obturateur de caméra consiste à intercepter le faisceau lumineux provenant de l'objectif lors du déplacement du film et à permettre son libre passage pendant l'immobilisation de ce dernier. Dans un appareil photographique, l'obturateur assure la régulation du flux lumineux incident.

**octal.** *adj.* Utilisant la base de numération 8; symboles utilisés : 0, ..., 7.

**octet.** *n.* Ensemble de huit bits.

**offset.** *n.* Procédé d'impression « à plat », qui a pour base la répulsion de l'eau et des matières grasses. L'origine du mot « offset » (mot à mot : décalque) vient en fait de la position, entre la forme imprimante et le papier, d'un cylindre de caoutchouc (blanchet) qui reporte l'encre de la plaque sur le papier.

**oligo-élément.** *n.* Bien qu'en très faible concentration, les oligo-éléments, qui sont des métaux ou des métalloïdes, semblent indispensables à la vie des êtres des différents règnes.

**ordinateur.** *n.* Il est formé de la réunion de l'unité centrale, de la mémoire centrale et des unités d'entrées-sorties.

**orthochromatique.** *adj.* Les émulsions orthochromatiques ont une sensibilité limitée aux radiations violettes, bleues, vertes et jaunes du spectre visible.

**oscillographe Blondel.** Dispositif permettant de visualiser de petites variations d'un courant électrique, par déviation, à l'aide d'un miroir solidaire d'un cadre de galvanomètre, d'un pinceau lumineux.

**ouverture relative.** L'ouverture relative d'un objectif détermine la quantité de lumière susceptible d'impressionner la surface sensible. Elle est donnée par la relation $\frac{I}{N} = \frac{O}{f}$ dans laquelle O caractérise le diamètre d'ouverture de la pupille d'entrée.

## P

**package.** *n.* Ensemble de programmes écrits pour une application donnée.

**paire électron-trou.** Le passage du courant électrique dans les semi-conducteurs est limité par le faible nombre des porteurs de charge en liberté. Quand on libère un électron d'un atome, il se déplace dans le réseau pour participer à la conduction. Le trou qu'il a laissé à sa place peut être comblé par un autre électron libre. Le trou participe donc aussi à la conduction.

**PAL.** Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs, « Phase Alternative Line ».

**panchromatique.** *adj.* Les émulsions panchromatiques ont une échelle de sensibilité qui s'étend sur tout le spectre visible. Leur courbe de sensibilité spectrale dépend en grande partie de la nature des sources lumineuses utilisées.

**papier.** *n.* Support de l'information écrite, obtenu par broyage de fibres de cellulose. Sa qualité varie en fonction de la quantité de cellulose pure qu'il contient. Les *papiers chiffons,* fabriqués à partir de fibres de lin, de coton ou de chanvre, sont d'une excellente qualité.

**papyrus.** *n.* Support de l'information écrite, obtenu par traitement de l'écorce d'un roseau de grande taille, le papyrus, qui lui a donné son nom. Utilisé dans l'ancienne Égypte, puis dans le monde romain et dans le monde occidental jusqu'au XII^e^ siècle, il a donné son nom au papier bien qu'il s'agisse d'une matière tout à fait différente.

**parallaxe.** *n.* Décalage de l'image enregistrée par rapport à l'objet visé, s'il est très rapproché, lorsque le système de visée n'est pas reflex.

**parchemin.** *n.* Cuir traité, qui a servi de support à l'information à partir du III^e^ siècle de notre ère, époque à laquelle fut inventé le procédé de traitement des peaux à Pergame (d'où le nom de *pergamentum,* parchemin), et durant tout le Moyen Age.

**parité (bit de).** Bit associé à un mot ou un octet servant à détecter les erreurs survenant dans ce mot ou cet octet.

**pâte chimique.** Pâte à papier obtenue après un traitement chimique du bois visant à la dégradation de la lignine.

**pâte mécanique.** Pâte à papier obtenue par un traitement mécanique du bois.

**perceptron.** *n.* Organe de classification adaptatif, dont le principe a été donné par Rosenblatt en 1958.

**perforateur de cartes, de rubans.** Périphérique permettant, sous contrôle de l'ordinateur, la perforation d'informations sur cartes ou sur rubans.

**période de récurrence d'un émetteur radar.** Durée entre deux trains d'impulsions émis.

**périphérique.** *n.* Organe d'entrée ou/et de sortie connecté à un ordinateur.

**perméabilité magnétique.** Quotient de l'induction magnétique et du champ magnétique qui la crée ($B = \mu H$) ; dépend du matériau considéré.

**Petzval.** Objectif cinématographique particulièrement utilisé sur les appareils de projection. L'objectif de type Petzval se compose, dans sa version simple, de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure étant traversée par un espace d'air.

**pH.** Logarithme décimal, changé de signe, de la concentration en ions hydrogène. Sert à définir l'acidité.

**phosphorescence.** *n.* Émission de lumière par des corps froids.

**photocomposition.** *n.* Composition des textes selon le procédé photographique.

**photodiode.** *n.* Dispositif semi-conducteur constituant une diode dont le courant inverse de fuite varie en fonction du flux lumineux qu'il reçoit.

**photo-électricité.** *n.* Modification des caractéristiques électriques de la matière sous l'action de la lumière.

**photogravure.** *n.* Procédé d'illustration des textes typographiques. L'application des principes de la photographie permet d'obtenir des plaques de zinc gravées dont le relief restitue l'image à reproduire.

**photon.** *n.* Élément d'énergie lumineuse exprimant l'aspect corpusculaire des ondes électromagnétiques.

**photopile.** *n.* Dispositif aux bornes duquel apparaît, quand il est éclairé, une force électromotrice liée au flux lumineux reçu.

**photorésistance.** *n.* Élément dont la résistance électrique varie en fonction du flux lumineux qu'il reçoit.

**phototransistor.** *n.* Dispositif semi-conducteur constituant un transistor dont le courant est commandé par le flux lumineux qu'il reçoit.

**piézo-électricité.** *n.* Apparition de charges électriques dans certains corps soumis à une pression ou à une déformation.

**piste.** *n.* Zone située devant la tête de lecture d'un disque ou d'un tambour magnétique.

**pleurage.** *n.* Variations lentes de la vitesse de rotation d'un disque ou de la vitesse de défilement d'une bande magnétique, qui se traduisent par une déformation très désagréable du son.

**plot.** *n.* Groupe d'échos issus d'une même cible et intégrés.

**plumbicon.** *n.* Tube de prise de vues ou analyseur d'images fonctionnant suivant un principe identique à celui du *Vidicon,* mais dont la couche photosensible présente de meilleures caractéristiques de fonctionnement.

**polarisation de la lumière.** La vibration des ondes électromagnétiques constituant la lumière, au lieu de se faire dans tout le plan perpendiculaire à la direction de propagation, ne se fait que dans une seule direction.

**polynôme générateur.** Polynôme à coefficients 0 ou 1, dont la connaissance permet de générer les polynômes correspondant aux mots-codes d'un code cyclique.

**pont de Wheatstone.** Circuit électrique à quatre branches servant à détecter un équilibre entre deux paires de résistances ou d'impédances.

**Porro (prisme de).** Système optique redresseur composé de deux prismes rectangulaires isocèles croisés à angle droit. Cet ensemble produit une inversion complète des images tout en donnant aux rayons émergents leur direction d'incidence.

**porteuse.** *n.* Onde de haute fréquence permettant le transport de l'information par modulation de son amplitude ou de sa fréquence.

**pouvoir discriminateur en distance.** Pouvoir de séparer par le traitement deux signaux (supposés de même vitesse radiale) issus d'objets voisins.

**pouvoir discriminateur en vitesse.** Pouvoir de séparer par le traitement deux signaux issus d'objets de vitesses radiales proches (les objets sont supposés rester à la même distance).

**pouvoir rotatoire.** Le pouvoir rotatoire d'une substance caractérise le fait qu'elle fait tourner le plan de polarisation de la lumière qui la traverse.

**pouvoir thermo-électrique.** Variation de la force électromotrice d'un couple thermo-électrique en fonction de la différence de température appliquée entre les deux soudures.

**ppm.** « Parties par million »; une teneur peut s'exprimer en ppm.

**prémagnétisation.** *n.* Procédé consistant à superposer au champ de modulation d'une tête de magnétophone un champ alternatif ultrasonore, afin d'améliorer la qualité de l'enregistrement.

**préprint.** *n.* Document non encore édité mais destiné à l'être. Appartient à ce que l'on appelle la littérature souterraine (*voir* cette expression).

**principe de Maxwell.** Fondement de la synthèse trichrome. Il se subdivise ainsi : choix des trois primaires de la restitution (rouge, vert, bleu) ; étalonnage du spectre à l'aide de ces primaires (fonction de mélange) ; sélection (sensibilités spectrales proportionnelles aux fonctions de mélange) ; restitution à l'aide des primaires choisies (positifs).

**probabilité de détection.** En présence d'un signal utile, c'est la probabilité pour que l'amplitude du signal composite soit plus grande que l'amplitude du seuil.

**probabilité d'erreur.** 1° Probabilité de transmission d'un symbole ou d'un message erroné dans un système de transmission. 2° Probabilité de mauvais classement d'une forme en reconnaissance des formes.

**probabilité de fausse alarme.** En absence de signal utile, un signal aléatoire peut dépasser en amplitude le niveau de détection fixé arbitrairement et appelé *seuil de comparaison*. La *probabilité de fausse alarme* est la probabilité pour que l'amplitude de ce bruit dépasse l'amplitude du seuil.

**procédé EPIC.** Procédé permettant d'isoler des zones les unes des autres dans un monocristal.

**profondeur de champ.** En photographie, zone qui s'étend en deçà et au-delà de la distance de mise au point et à l'intérieur de laquelle la netteté peut être considérée comme acceptable.

**programme.** *n.* Suite d'instructions destinées à un ordinateur.

**projecteur (acoustique).** Émetteur sonore sous-marin qui transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en ondes acoustiques. C'est l'équivalent, dans l'eau, du haut-parleur dans l'air.

**projecteur (optique).** Appareil de projection. Il assure la restitution synchrone des images et des sons enregistrés lors de la prise de vues.

**pyromètre.** *n.* Appareil utilisé pour la mesure des températures par comparaison optique de la surface du corps dont on veut connaître la température avec un filament chauffé.

## R

**radar secondaire.** Système émetteur en relation bilatérale avec une cible équipée d'un dispositif qui détecte l'onde émise et renvoie cette énergie après amplification.

**raffinage.** *n.* Lors de la fabrication du papier, traitement mécanique de la pâte, qui sépare les fibres et libère les fibrilles; celles-ci sont des agrégats de chaînes cellulosiques.

**rapidité.** *n.* Désigne la sensibilité générale des émulsions photographiques. Le terme s'explique par la relation liant la sensibilité à la durée d'exposition à la lumière.

**réaction (électronique).** Application à l'entrée d'un système électronique d'une partie du signal de sortie. Si ce dernier est en opposition de phase avec le signal d'entrée, il s'agit d'une contre-réaction.

**recherche documentaire.** La recherche documentaire ou bibliographique est la recherche des références des documents existants, sur tel ou tel sujet. Cette activité est désignée également sous le terme de *documentation*.

**réciprocité (acoustique).** Capacité d'un transducteur à fonctionner à la fois en émission et en réception. Cet effet est souvent utilisé dans les antennes de sonar pour diminuer l'encombrement.

**réciprocité (effet de).** Défaut d'intégration qui caractérise l'absence de réciprocité entre la valeur du flux parvenant sur la surface sensible et la durée de son action.

**reconnaissance des formes.** Branche de la science et de la technologie dont le but est le développement d'outils permettant une discrimination de signaux, d'images.

**récursivité.** *n.* En informatique, possibilité pour un sous-programme de s'appeler lui-même.

**redondance.** *n.* Pour un code, complément à 1 de l'efficacité.

**réentrance.** *n.* Possibilité pour un sous-programme d'être partagé entre plusieurs utilisateurs.

**registre.** *n.* Mot spécialisé de la mémoire à accès rapide et siège d'instructions spéciales.

**registre à décalage.** Dispositif synchrone qui permet de mémoriser des séquences de symboles et de les déplacer à raison d'une position par impulsion appliquée.

**règle de la distance minimum.** Règle de décodage, qui associe à un message reçu le mot-code le plus proche au sens de la distance de Hamming.

**règle du *k*-ième voisin le plus proche.** Règle de classification non paramétrique, qui consiste à rechercher les *k* voisins les plus proches de la forme à classer et à attribuer cette forme à la classe la plus représentée dans ces *k* voisins.

**relief.** *n.* Phénomène physiologique, principalement donné par la vision binoculaire, chaque rétine recueillant deux images distinctes d'un même objet. En cinéma, le procédé stéréoscopique utilise cette particularité en différenciant à la prise de vues et à la projection les différents couples d'images.

**réluctance.** *n.* Dans un circuit magnétique, quotient de la force magnétomotrice par le flux d'induction.

**renforcement.** *n.* Traitement mathématique effectué sur une image dans le but de faire apparaître les arêtes des objets.

**répertoire bibliographique.** Ouvrage recensant les livres ou articles de périodiques édités pendant une période donnée dans un pays ou sur un thème donné. Les répertoires bibliographiques sont aussi appelés bibliographies (*voir* ce terme).

**réseau de bibliothèques.** Groupement d'organismes de documentation (bibliothèques ou centres de documentation) qui coopèrent afin d'améliorer la qualité du service rendu à leurs utilisateurs. Actuellement, cette expression désigne généralement des réseaux dont les organismes membres sont reliés par téléinformatique et peuvent échanger des informations « en conversationnel », c'est-à-dire en direct. L'échange peut se limiter aux références (*voir* réseau documentaire), ou s'élargir à une gestion en coopération, avec la constitution de catalogues collectifs réalisés « en partage » par l'ensemble des membres participants.

**réseau documentaire.** Groupement d'organismes de documentation (*voir* réseau de bibliothèques) dont l'activité est axée sur l'échange de références, comme, par exemple, le réseau MEDLARS (ou MEDLINE dans sa forme automatisée), le réseau de l'Agence spatiale européenne, ou encore les réseaux organisés autour de Lockheed Missile Systems ou de System Development Corporation Search Service.

**résistance de rayonnement.** Quotient de la puissance moyenne rayonnée par une antenne, par le carré de l'intensité du courant qui la parcourt.

**ressuage.** *n.* Procédé de détection des défauts qui débouchent à la surface d'une pièce mécanique, par l'utilisation de produits mouillants.

**rétrofocus.** *n.* Objectif de courte focale disposant d'un *tirage* très important. Cette particularité est due à la présence d'un ensemble frontal divergent de grand diamètre séparé nettement du système arrière convergent.

**réverbération.** *n.* Bruit très gênant pour les systèmes sonar; il est provoqué par la diffusion de l'onde émise sur des particules en suspension dans l'eau, par des bulles, des poissons, ou sur la surface et le fond. Une partie de l'onde émise est ainsi renvoyée sur le récepteur. On peut en limiter l'inconvénient en effectuant un traitement approprié du signal (traitement cohérent).

**rhomboédrique (système).** Système de cristallisation dans lequel les faces principales des cristaux constituent un parallélépipède dont les six faces sont des losanges égaux.

**rotative.** *n.* Machine à imprimer sur laquelle la forme d'impression, cylindrique, permet le mouvement circulaire continu de la forme.

**ruban magnétique.** Mémoire constituée d'un ruban recouvert de matériau magnétique défilant devant une tête de lecture-écriture.

**rupture de séquence.** *Syn.* de branchement.

## S

**saisie des données.** Action ou méthode pour recueillir les données.

**scanning (poursuite angulaire par).** Exploration conique du lobe d'un aérien, possible grâce à la technique suivante : dans le cas d'un aérien à réflecteur parabolique éclairé par une source *défocalisée*, le lobe d'antenne n'est pas orienté selon l'axe mécanique de l'antenne. Si le cornet tourne autour de cet axe, le lobe de l'aérien tourne aussi autour du même axe.

**scintillement.** *n.* Fluctuations rapides de la vitesse de rotation d'un disque ou de la vitesse de défilement d'une bande magnétique, entraînant une déformation du son.

**scrutateur de données.** Dispositif à plusieurs entrées, chargé de recueillir séquentiellement les données.

**SECAM.** Initiales du nom d'un procédé de transmission des images en couleurs « Séquentiel Couleur à Mémoire ».

**semi-conducteur.** *n.* Substance dont la conductivité varie de façon considérable avec la température; les semi-conducteurs deviennent des isolants à très basse température.

**sensitométrie.** *n.* Branche de la technique photographique qui a pour objet l'étude des propriétés caractéristiques des surfaces sensibles. Elle comprend trois phases : l'exécution des sensitogrammes, l'établissement des courbes caractéristiques et l'exploitation de ces courbes.

**séquentiel (accès).** Organisation de fichiers où les enregistrements sont ordonnés, et où l'accès à un enregistrement nécessite la lecture préalable de tous ses prédécesseurs.

**séquentielle (mémoire).** *Voir* mémoire cinématique.

**série de Fourier.** Série trigonométrique associée à une fonction périodique.

**shadow mask.** S'applique au tube cathodique couleur qui possède un masque au travers duquel les points *Rouge*, *Vert* et *Bleu* des luminophores ne peuvent être atteints que par un seul des trois canons à électrons.

**silicium.** *n.* Élément semi-conducteur qui a remplacé le germanium dans la plupart des composants électroniques. Son avantage réside surtout dans de meilleures caractéristiques en fonction de la température. Tous les circuits intégrés fabriqués actuellement utilisent le silicium.

**simplifilm.** *n.* Trucage cinématographique effectué lors de la prise de vues, qui consiste à remplacer un élément de décor par une photographie de petites dimensions que l'on place tout près de l'objectif de la caméra.

**singulier.** *adj.* Propriété d'un code dont les mots-codes ne sont pas tous distincts.

**software.** *Voir* logiciel.

**sonar.** *n.* Système de détection, de navigation ou de communication utilisant les propriétés de propagation des ondes acoustiques sous-marines.

Contraction de « Sound Navigation and Ranging » (navigation et télémétrie sonores).

**soudures chaude et froide.** Dans un thermocouple, la soudure froide est maintenue à une température de référence, la soudure chaude étant placée dans l'ambiance de la température à mesurer.

**source.** *n.* Organe fournissant des messages à transmettre.

**spectre.** *n.* Désigne le contenu en fréquence (ou longueur d'onde) d'une onde électromagnétique. Une lumière monochromatique a un spectre composé d'une seule raie.

**spooler.** *n.* Module chargé de la communication avec le lecteur de carte ou l'imprimante dans les systèmes à multiprogrammation.

**stationarité.** *n.* Qualité d'une fonction aléatoire dont les propriétés statistiques sont indépendantes du temps.

**stationarité du second ordre.** Qualité d'une fonction aléatoire dont la moyenne est indépendante du temps et dont la fonction d'autocovariance centrée ne dépend que de la différence $t_1$-$t_2$.

**stéréophonie.** *n.* Méthode de reconstitution du champ sonore original à l'aide de deux haut-parleurs situés à gauche et à droite de l'auditeur.

**superhétérodyne.** *n.* Méthode de décalage en fréquence appliquée à l'entrée des récepteurs de radio ou de télévision avant l'amplification à fréquences moyennes. Utilise un oscillateur local dont la fréquence est modifiée en fonction de celle de la porteuse que l'on veut capter.

**support.** *n.* Produit constitué de triacétate de cellulose ou de polyester, et qui sert à maintenir l'émulsion photographique.

**surface effective** ou **surface radioélectrique d'une antenne.** Surface Σ d'un aérien à loi d'éclairement uniforme, telle que, G étant le gain d'une antenne quelconque :

$$\Sigma = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$$

λ est la longueur d'onde du rayonnement dans le milieu de propagation.

**surface équivalente d'une cible.** Elle caractérise la faculté de rerayonnement d'une cible. Pratiquement, une cible de surface équivalente σ se comporte comme si elle recevait σ fois la densité d'énergie qui l'éclaire et la réémettait de façon omnidirectionnelle.

**surmodulation.** *n.* Modulation excessive de l'onde porteuse entraînant une distorsion du signal détecté.

**systématique.** *adj.* Qualité d'un code à contrôle de parité, dont les chiffres de parité sont simplement concaténés aux chiffres d'information.

**système d'exploitation.** Ensemble de tous les programmes, généralement fournis par le constructeur, permettant une utilisation aisée de la machine.

## T-U

**table traçante.** Périphérique commandable par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique digital et permettant de tracer des courbes sur papier.

**tambour magnétique.** Mémoire constituée d'un cylindre recouvert d'un matériau magnétique défilant devant des têtes magnétiques.

**téléinformatique.** *n.* Étude et réalisation de dispositifs et de traitements utilisant un ou plusieurs modulateurs-démodulateurs.

**télémètre acoustique.** Système de transducteurs permettant de déterminer des distances, soit par écoute du bruit émis par un objet (télémètre passif), soit en mesurant le temps de propagation d'une onde réfléchie (télémètre actif).

**téléobjectif.** *n.* Objectif de longue focale composé d'un ensemble frontal convergent suivi d'un système divergent qui lui assure un tirage sensiblement réduit.

**température de couleur.** Température du corps noir incandescent émettant une lumière de cette couleur.

**temps d'accès mémoire.** Temps nécessaire pour extraire un bit d'information de la mémoire.

**temps partagé.** Type de multiprogrammation où l'allocation des ressources de l'ordinateur à chacun des utilisateurs se fait par tranches de temps.

**temps réel.** Type de multiprogrammation où l'allocation des ressources de l'ordinateur se fait par priorités selon les divers utilisateurs.

**tétraphonie.** *n.* Méthode de reconstitution approchée de l'espace sonore, utilisant quatre haut-parleurs qui entourent l'auditeur.

**théorème de Shannon.** Théorème célèbre de la théorie de l'information, démontrant qu'on peut réduire autant que désiré la probabilité d'erreur dans une transmission avec bruit sans réduire le taux de transmission à zéro.

**thermistance.** *n.* Résistance électrique très sensible à la température.

**thermoémissif.** *adj.* Le pouvoir thermoémissif d'une substance caractérise la quantité de particules chargées (électrons) qu'elle émet quand elle est chauffée.

**thermométrie.** *n.* Métrologie appliquée aux températures.

**thesaurus.** *n.* Lexique de termes utilisés comme mots-clefs pour la description du contenu des documents et la réalisation des catalogues et répertoires bibliographiques. Dans un thesaurus, les termes sont sélectionnés, organisés, hiérarchisés, de façon à constituer un langage documentaire plus proche du langage naturel que les codes utilisés dans les classifications.

**tomographie.** *n.* Procédé ayant pour but d'obtenir une image radiographique claire d'une couche du corps humain.

**tore de ferrite.** Tore magnétique, élément de base de beaucoup de mémoires d'ordinateur, présentant un cycle d'hystérésis quasi rectangulaire.

**train de travaux.** Suite de programmes lus séquentiellement par l'ordinateur et exécutés dans l'ordre d'arrivée.

**traitement cohérent.** Appareillage électrique d'un sonar contrôlant la largeur de la bande passante et la durée des impulsions à l'émission ; exploite ces caractéristiques pour accroître le rapport entre le signal utile et les bruits parasites.

**traitement d'images.** Ensemble de technique utilisées pour extraire des informations d'images en noir et blanc ou en couleurs.

**traitement par lot.** Exécution successive de divers trains de travaux.

**traitement de surface (d'une lentille).** Procédé de réduction des pertes de lumière dues à la réflexion des rayons incidents à la surface des lentilles. Il consiste à effectuer sous vide une projection cathodique de fluorure de métaux légers, d'une épaisseur égale au quart de la longueur d'onde pour laquelle le traitement est réalisé (en général, la raie jaune du sodium de 0,55 μ).

**trame.** *n.* En télévision, désigne l'ensemble des lignes constituant le balayage d'une demi-image, sur toute la hauteur de l'écran cependant, car le balayage est entrelacé par deux trames successives formant une image.

**transducteur.** *n.* Élément ou dispositif permettant d'effectuer la conversion d'une grandeur en une autre grandeur. *Ex. :* transducteur piézo-électrique qui convertit une pression en une tension électrique.

**transfert.** *n. Syn.* de branchement, en informatique.

**transfert (fonction de).** On appelle fonction de transfert d'un système linéaire le rapport des expressions complexes du signal de sortie et du signal d'entrée.

**transition.** *n.* Modification de l'état énergétique d'un noyau atomique par désintégration ou désexcitation. Lors de la *transition isobarique*, le noyau à l'état final a la même masse atomique que le noyau à l'état initial. La *transition isomérique* concerne le passage d'un état stable à un état instable, avec conservation de la masse et du numéro atomique.

**transparence.** *n.* Trucage cinématographique qui consiste à projeter derrière un écran les images d'un décor précédemment filmé et à enregistrer simultanément à l'aide d'une caméra ces images et les acteurs qui sont placés devant cet écran.

**trichromie.** *n.* Propriété de l'œil permettant de reconstituer toutes les couleurs par superposition, en proportions variables, de trois d'entre elles seulement.

**triplet.** *n.* Objectif anastigmatique mis au point en 1893 par Taylor et qui, à l'origine, se composait d'une lentille centrale divergente entourée de deux lentilles convergentes.

**tube autoconvergent.** Tube cathodique de télévision en couleurs, dans lequel les canons électroniques sont situés dans un même plan.

**tube cathodique.** Tube électronique destiné à former une image sur une de ses faces, par bombardement d'une couche luminescente par des électrons fortement accélérés (autre appellation : tube-image).

**tube trichrome.** Tube cathodique de la télévision en couleurs dont les luminophores sont *Rouge*, *Vert* et *Bleu*.

**typographie.** *n.* Ensemble des procédés d'imprimerie utilisant l'assemblage de caractères en relief et, par extension, technique utilisant aussi le plomb.

**unité.** *n.* Organe de l'ordinateur réalisant une fonction déterminée. *Ex. :* unité centrale, de commande, arithmétique et logique, d'entrées-sorties.

## V-W-Z

**vidéodisque.** *n.* Support en forme de disque utilisé pour la conservation des images de télévision.

**vidéofréquence** ou **vidéo.** *n.* S'applique aux fréquences dans la bande ordinairement utilisée pour transmettre les images.

**Vidicon.** *n.* Tube électronique de prise de vues utilisé dans les caméras de télévision. Il contient la surface sensible qui transforme l'image en un signal électrique.

**visée reflex.** Système de visée qui permet à l'opérateur de voir exactement l'image qui se formera sur la pellicule. Son principe consiste à prélever entre l'objectif et la fenêtre d'impression une partie des rayons lumineux provenant du sujet et à la renvoyer ensuite à l'aide d'un prisme à réflexion totale vers une lunette de visée placée le long de l'appareil.

**volume de confusion.** Domaine d'espace associé à un radar à l'intérieur duquel deux cibles ne peuvent donner naissance à deux signaux distincts.

**wehnelt.** *n.* En télévision, électrode d'un canon à électrons, toujours voisine de la cathode, et qui a pour rôle de commander le nombre d'électrons qui pourront passer vers les électrodes de focalisation et sortir du canon. Commande l'intensité de la trace du faisceau électronique sur l'écran du tube cathodique.

**Wollaston (prisme de).** Inverseur d'images, ce prisme rectangulaire ordinaire n'utilise que les pinceaux lumineux sensiblement parallèles à l'hypoténuse (lunette de visée des caméras).

**zoom.** *n.* L'objectif à focale variable ou zoom est constitué d'un objectif classique, à l'avant duquel est interposé un système afocal à grandissement variable dont le déplacement est compensé par celui d'un autre groupe mobile (compensation optique ou mécanique).

## UNITÉS DE MESURE

| Grandeur | Dénomination | Symbole | Équivalences | Dimension |
|---|---|---|---|---|
| Longueur | mètre<br>mille | m |  <br>1 852 m | L |
| Aire | mètre carré | $m^2$ | | $L^2$ |
| Volume | mètre cube<br>litre<br>stère | $m^3$<br>l<br>st |  <br>$10^{-3}$ $m^3$<br>1 $m^3$ | $L^3$ |
| Masse | kilogramme<br>tonne | kg<br>t |  <br>$10^3$ kg | M |
| Temps | seconde | s | | T |
| Fréquence | hertz | Hz | | $T^{-1}$ |
| Vitesse | mètre par seconde<br>nœud | m/s |  <br>1 mille par heure | $LT^{-1}$ |
| Accélération | mètre par seconde carrée | $m/s^2$ | | $LT^{-2}$ |
| Force | newton<br>dyne | N<br>dyn |  <br>$10^{-5}$ N | $LMT^{-2}$ |
| Énergie, travail<br>ou quantité de chaleur | joule<br>erg<br>watt-heure<br>calorie<br>thermie<br>frigorie | J<br> <br>Wh<br>cal<br>th<br>fg |  <br>$10^{-2}$ J<br>3 600 J<br>4,1855 J<br>$4{,}1855 \times 10^6$ J<br>$-4{,}1855 \times 10^3$ J | $L^2MT^{-2}$ |
| Puissance | watt<br>cheval-vapeur | W<br>ch |  <br>735 W | $L^2MT^{-3}$ |
| Pression | pascal<br>bar<br>atmosphère<br>centimètre de mercure | Pa<br> <br>atm.<br>cm Hg |  <br>$10^5$ Pa<br>1,013 25 bar<br>1 bar = 75 cm Hg | $L^{-1}MT^{-2}$ |
| Viscosité (dynamique) | poiseuille<br>poise | Pl<br>Po |  <br>$10^{-1}$ Pl | $L^{-1}\,MT^{-1}$ |
| Intensité de courant électrique | ampère | A | | A |
| Force électromotrice<br>et différence de potentiel | volt | V | | $ML^2T^{-3}A^{-1}$ |
| Résistance électrique | ohm | Ω | | $ML^2T^{-3}A^{-2}$ |
| Quantité d'électricité | coulomb | C | | AT |
| Intensité de champ électrique | volt par mètre | V/m | | $MLT^{-3}A^{-1}$ |
| Flux magnétique | weber | Wb | | $ML^2T^{-2}A^{-1}$ |
| Température | degré Kelvin<br>degré Celsius | °K<br>°C | t (°C) = T (°K) — 273 | |
| Intensité lumineuse | candela | cd | | |
| Flux lumineux | lumen | lm | | |
| Éclairement | lux | lx | | |
| Luminance | candela par $m^2$ | $cd/m^2$ | | |
| Activité nucléaire | $seconde^{-1}$<br>curie | $s^{-1}$<br>Ci |  <br>$3{,}7 \times 10^{10}$ $s^{-1}$ | |
| Quantité de rayonnement X ou $\gamma$ | rœntgen | R | | |

# INDEX DES NOMS CITÉS

Les références sont données par l'indication du numéro de la page où se trouve le terme, suivi le cas échéant, des lettres *a* et *b* se rapportant respectivement à la colonne de gauche et à la colonne de droite de chaque page.

Les références sont données, pour les illustrations, par le numéro de la page en caractères gras et, pour le texte, par le numéro de la page en caractères maigres pour une simple citation, et en italique pour un développement plus complet.

Pour les différentes variantes se rattachant à un même terme, un astérisque indiquera le renvoi à ce dernier. *Ex.* :
circuit à bascule
* trigger
trigger (ou circuit à bascule) **63**

## T



## U



## V - X - Z



Imprimé en Italie

# GRANDE ENCYCLOPÉDIE ALPHA DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

# TECHNOLOGIE II

GRANGE BATELIÈRE, ÉDITIONS ATLAS, PARIS - ÉDITIONS KISTER, GENÈVE
ÉDITIONS ÉRASME, BRUXELLES-ANVERS



RTL
J. CARLIER
GISCARD D'ESTAING
F. MITTERRAND

**Publiée sous le haut patronage de :**
**Messieurs les professeurs :**
**Jean DORST, membre de l'Institut,**
**Charles FEHRENBACH, membre de l'Institut,**
**Roger HEIM, membre de l'Institut,**
**Monsieur l'amiral André JUBELIN,**
**Messieurs les professeurs :**
**Pierre LÉPINE, membre de l'Institut,**
**Louis LEPRINCE-RINGUET, de l'Académie française,**
**Jean-François LEROY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle,**
**Henri NORMANT, membre de l'Institut,**
**Monsieur Jacques PICCARD, docteur ès sciences h.c.**

| | |
|---|---|
| *Réalisation* | IDÉES ET ÉDITIONS<br>16, avenue de Friedland, 75008 Paris. |
| *Comité de direction* | Simone DEVAUX,<br>Uberto TOSCO. |
| *Rédaction* | Françoise MENU, Monique LIONS-GENTIL,<br>Vanina DORÉ, Marie-Noëlle PAILLETTE. |
| *Recherche de l'illustration* | Mathilde RIEUSSEC. |
| *Mise en pages* | Tito TOPIN et Serge BROCHE. |
| *Illustrations techniques* | Richard COLIN. |
| *Coordinateur des dessins* | Mario LOGLI. |
| *Fabrication* | Sylvia COLIN, Jocelyne TÉPÉNIER. |
| *Directeur de la publication* | Bernard BOSC. |

Les schémas portant la référence Richard Colin
ont été réalisés d'après des croquis fournis par les auteurs.

*Dans ce volume :*

LA TECHNOLOGIE (II)

L'INFORMATION



D. Burnett - Gamma

*Ont collaboré à ce volume :*

pour les généralités :

B. DUBUISSON.

pour la saisie des données :

P. BAÉ.

pour le codage,

les mémoires et l'analyse du signal :

B. DUBUISSON.

pour la détection :

A. FOURRIER-LAMER, pour le radar.

C. HENNION, pour le sonar.

Y. LE GALLIC, pour la détection par les rayons X.

J.-F. CHRÉTIEN, pour les contrôles non destructifs en industrie et les examens non invasifs en instrumentation médicale.

pour l'informatique :

B. VACHON.

pour la radiodiffusion et les procédés d'enregistrement et de reproduction des sons :

J.-F. GELLY.

pour la télévision :

P. BAÉ.

pour la photographie :

P. KOWALISKI.

pour le cinéma :

J.-M. RAVON.

pour le papier et la presse :

M. GELUS et F. PERRIER.

pour la conservation de l'information :

L. VEZIER.

pour l'intelligence artificielle :

B. DUBUISSON.

Cliché Thomson - CSF

▲ *Un studio d'enregistrement de télévision: le XXe siècle est le siècle de la révolution technologique par les ondes et peut-être lors de son dernier quart assistera-t-on au déclin de la presse écrite au profit de la presse parlée et télévisée.*

# L'INFORMATION. GÉNÉRALITÉS

*Information, mot aux multiples sens et aux multiples interprétations. Ouvrons le dictionnaire* Petit Robert *(édition abrégée) et lisons quelques-unes des définitions proposées :* **Information.** « Définition courante : *Renseignements sur quelqu'un, sur quelque chose.* D'utiles informations. *Renseignement ou événement qu'on porte à la connaissance d'une personne, d'un public...* Informations données par la radio... *XXe siècle : Ensemble des informations, et par extension, action d'informer le public, l'opinion.* Agence d'information... Scientifique : *Élément ou système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux... ; ce qui est transmis (objet de connaissance, de mémoire)*... Théorie, traitement de l'information... Information et cybernétique... »

*Ces définitions couvrent l'ensemble des technologies développées dans ce volume.*

*L'information est partout, nécessaire à toute décision. La nécessité d'une information pure et complète est bien connue du décideur. Combien de « mauvaises » décisions sont prises à partir d'informations tronquées ou invalides (exemple historique de la dépêche d'Ems) ; notre siècle se nourrit d'informations claires et rapides.*

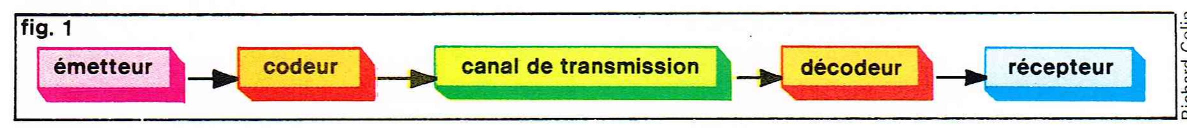
*En époque de tension, un message ne doit pas mettre plusieurs heures pour aller de l'Est à l'Ouest. Quelques exemples permettent de voir le chemin parcouru. Austerlitz (1805) ne fut annoncé aux Parisiens que quatre jours après. Au milieu du XIXe siècle (1830), une liaison Londres-les Indes avait une durée moyenne de cinq mois... Combien de décisions étaient périmées ! A moins que cette époque n'ait su vivre ! Aujourd'hui, un événement important qui se produit dans un pays quelconque peut être connu du reste du monde avec une rapidité qui ne nous étonne plus. L'information a suivi le progrès technologique des moyens de communication.*

*Le XIXe siècle raisonnait en termes d'énergie. Mais deux faits vont bouleverser le XXe siècle : la mécanisation complète du travail et le travail sur signes et par signes (développement des outils mathématiques). Le besoin de communications fiables est un élément essentiel de notre monde dit moderne, d'où un développement « exponentiel » de systèmes de communication.*

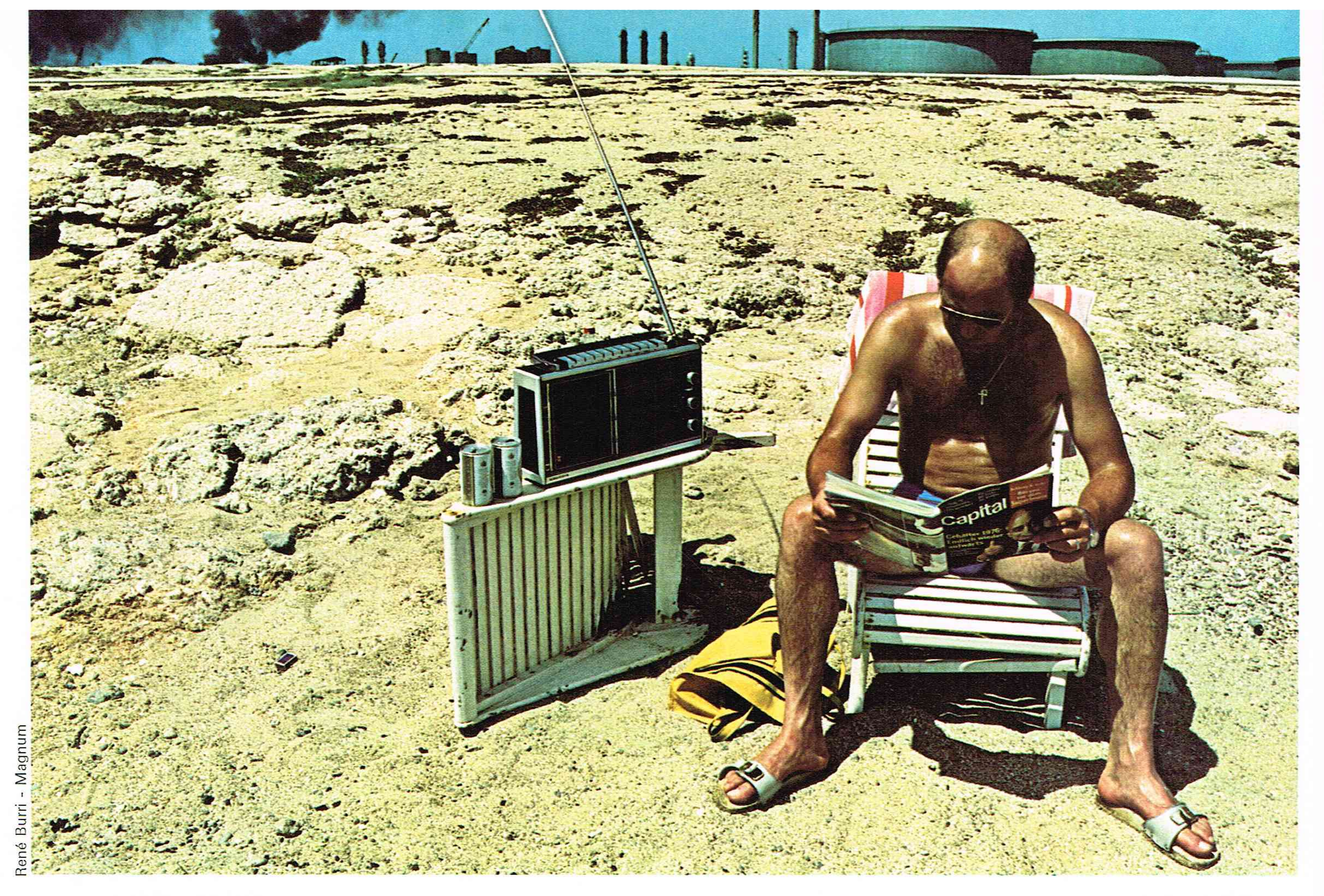
*Mais qu'est-ce qu'un* **système de communication?** *Le schéma général en a été proposé par Shannon dès 1948 (fig. 1). Tout mauvais fonctionnement d'un de ces éléments ou tout phénomène perturbatoire superposé au signal entraîne une perte d'information.*

*Ce schéma est général ; sans le discuter complètement, ce qui sera fait dans une partie ultérieure, traduisons-le par un exemple : l'émetteur est le lieu d'où provient la nouvelle, la personne la créant (par exemple, le contrôle d'un aéroport annonce un détournement d'avion) ;* le codeur *sera le journaliste de la presse écrite expliquant ce fait. L'article est ensuite transmis à la composition et imprimé comme partie d'un journal* (canal de transmission). *Le* décodeur *et le* récepteur *sont dans cet exemple une seule et même personne : le lecteur lisant le journal. La perte d'information peut avoir différentes causes : phrases sibyllines du journaliste mal interprétées à la lecture, coquilles à l'impression (lignes inversées rendant l'article incompréhensible...).*

*Cet exemple trivial permet de comprendre la richesse de la formulation de Shannon qui porte le nom de* **théorie de l'information.** *Développée après la guerre, cette théorie est toujours de mise avec les applications multiples utilisées de nos jours, applications qui ne se limitent pas aux données des communications.*




◄ *Figure 1 : schéma général d'un système de communication proposé par Shannon en 1948.*




René Burri - Magnum

▲ *Dans le langage courant, le mot* information *est souvent interprété dans le sens de « nouvelle » : on écoute les informations à la radio ; en fait, son sens est beaucoup plus vaste.*

▶ *Page ci-contre, en bas, un transistor à effet de champ (pour la haute fréquence). Après la Seconde Guerre mondiale, l'invention du transistor donna naissance à l'industrie des semi-conducteurs, en plein développement à l'heure actuelle.*

*Le mot information est aussi souvent interprété dans le langage courant par* nouvelle. *On écoute les « informations » de la radio... Nous vivons à l'époque des mass media où toute nouvelle d'un coin du monde peut être répercutée dans toutes les autres parties.*

*Avant, seule la presse écrite transmettait les informations et c'était une presse politique. Les feuilles étaient orientées et caractéristiques d'un parti ou d'une tranche de la société. Puis sont nés dans la presse écrite des journaux dits d'information où des journalistes exprimaient une opinion sous leur signature. Entre-temps, le cinéma devenait parlant, apparaissaient les actualités cinématographiques, condensé imagé de quelques faits marquants. La radio, les magazines, la télévision enfin ont fait entrer dans chaque foyer l'actualité, le conseil, la distraction.*

*On peut dire que dès 1930 le problème de l'information se posait en termes sociaux. Le problème de communication de masse suscite des inquiétudes dans le monde contemporain. Jusque dans les années soixante, d'importantes recherches sur les mass media ont eu lieu aux États-Unis en particulier, puis dans les pays d'Europe.*

*Le problème se pose peut-être aussi, de manière accrue aujourd'hui, en termes politiques.*

*On peut dire que le XXe siècle est le siècle de la révolution technologique par les ondes, et que, peut-être, lors de son dernier quart, on assistera au déclin de la presse écrite au profit de la presse parlée et surtout télévisée. Verra-t-on demain le commun des mortels capter sur son téléviseur des informations transmises par satellite, venant d'un pays lointain. Ce n'est plus actuellement un problème technologique, on touche à la souveraineté d'un pays et ce sera vraisemblablement un frein au développement des communications que l'on pourrait qualifier de « tous azimuts ».*

*Effectuons un bref historique de l'apparition de quelques moyens de communication.*

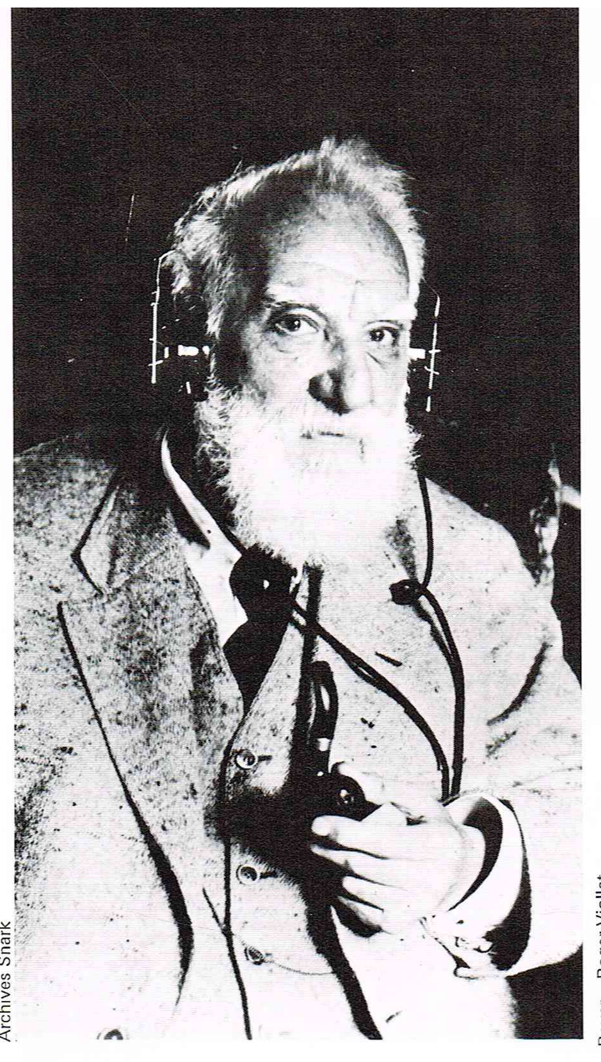
*Le télégraphe de Chappe est né en 1790 : c'était la suite logique d'une facile expérimentation dont les idées, sinon le principe, remontaient parfois... à l'Empire romain. La télégraphie électrique (Morse, Cooke, Wheatstone, Steinheil, 1830-1840) allait suivre et être adoptée dans les différentes contrées du monde. Dès le milieu du XIXe siècle, le télégraphe est pratiquement un service ouvert au public en France, en Angleterre, aux États-Unis.*

*L'histoire se poursuit par l'installation de câbles sous-marins : entre l'Angleterre et l'Irlande en 1852 ; entre l'Angleterre et la Belgique ; dans la mer Noire durant la guerre de Crimée. Le couronnement fut la pose (difficile et riche d'aventures) du câble transatlantique qui fonctionna de manière sûre à partir de 1866.*

*Le dernier quart du XIXe siècle voit le télégraphe devenir un objet courant : on communique aisément à l'aide de cet appareil. Il s'améliore grâce à Émile Baudot, puisque les communications peuvent se faire directement avec un clavier alphanumérique et non plus en code Morse : le code Baudot est maintenant universellement connu et c'est un exemple classique donné pour le codage.*

*Le nom du téléphone est associé à Graham Bell (1876) : il suivait les travaux du physicien allemand Philippe Reiss; son invention fut améliorée par Edison qui permit, en y ajoutant une source d'énergie, d'accroître les distances de communication. En 1877 se fondait alors la célèbre compagnie « Bell Telephone Association ».*

*Dès 1857, Edouard Leon Scott avait pensé et construit un phonographe ; l'appareil enregistrait les vibrations faites par le son sur une membrane. En 1877, Charles Cros créait le paléophone, et non seulement on enregistrait mais on*



Archives Snark



Boyer - Roger Viollet

▲ *A gauche, Alexander Graham Bell (1847-1922), à qui l'on doit l'invention du téléphone (en 1876) et qui a donné son nom à la société « Bell Telephone Association ».*
*A droite, un atelier de fabrication de phonographes aux environs de 1905 : hall d'audition et de mise sous boîtier des appareils.*

*reproduisait. La voie était ouverte pour la prodigieuse industrie actuelle du disque.*

*Le cinéma est né au milieu du XIXe siècle. Stampfer inventait dès 1833 le stroboscope, puis, en 1853, Franz von Uchatius améliorait l'idée de la lanterne magique et obtenait de grossières projections. En 1888, Jules Marey réalisait un appareil rudimentaire de prise de vues, et en 1889 Edison créait le film de 35 mm avec perforation. Les techniques de projection cinématographique allaient ensuite être rapidement mises au point dans plusieurs pays : la France connaît alors l'invention de Louis Lumière. Malheureusement, Lumière ne crut pas en sa création ; il fallut le génie inventif de Georges Méliès pour commencer à exploiter le cinéma. Qui n'a vu ces vieux films, bourrés de truquages aux décors somptueux, véritables paradis pour les rêves ? L'industrie du cinéma allait naître, fortune d'Hollywood : le cinéma parlant, en couleurs (le Technicolor), en relief...*

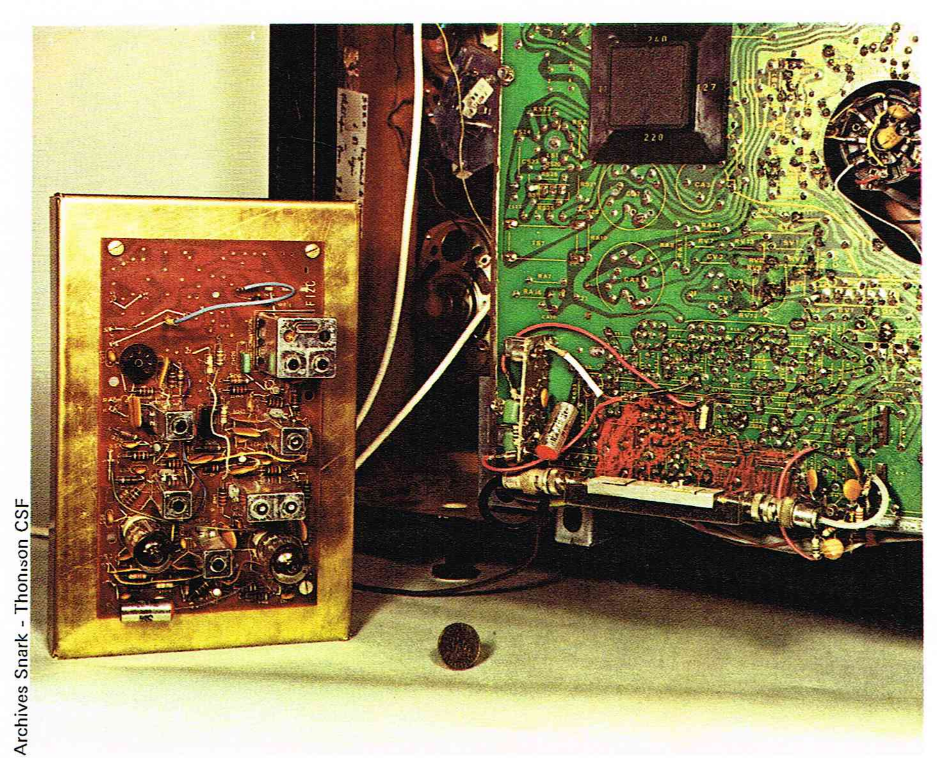
*La radio, quant à elle, se perfectionne en huit ans. Hertz avait prouvé l'existence d'ondes électriques mises en évidence par Faraday et par Feddersen, et en 1895 la radio naissait : A. Popov réussissait à effectuer une transmission en utilisant un microphone à limaille. Marconi reprit cette invention et accrût la portée des transmissions (4 kilomètres en 1896, 15 en 1897) ; il créa la « Wireless Telegraph and Signal Company ». La radio prenait son essor, marquée par quelques inventions importantes (accord des antennes à l'émission et à la réception, détecteur à galène [1906]). Pendant ce temps, la technique des télécommunications se mettait au point. En 1906 eut lieu la première liaison par radiotéléphone. En 1907, De Forest inventa la triode qui allait changer tous les systèmes de télécommunication. De 1911 à 1914, on utilisa les immenses possibilités de cet outil : pour amplifier de faibles signaux, générer des signaux*



Texas Instrument

Cornell Capa - Magnum

▲▼ *La télévision a apporté l'information non seulement par le son mais aussi par l'image, en noir et blanc d'abord, puis en couleurs. Elle est actuellement un équipement courant dans le monde industrialisé (en haut) mais peu d'entre nous savent déchiffrer la complexité du câblage d'un poste de télévision (en bas).*

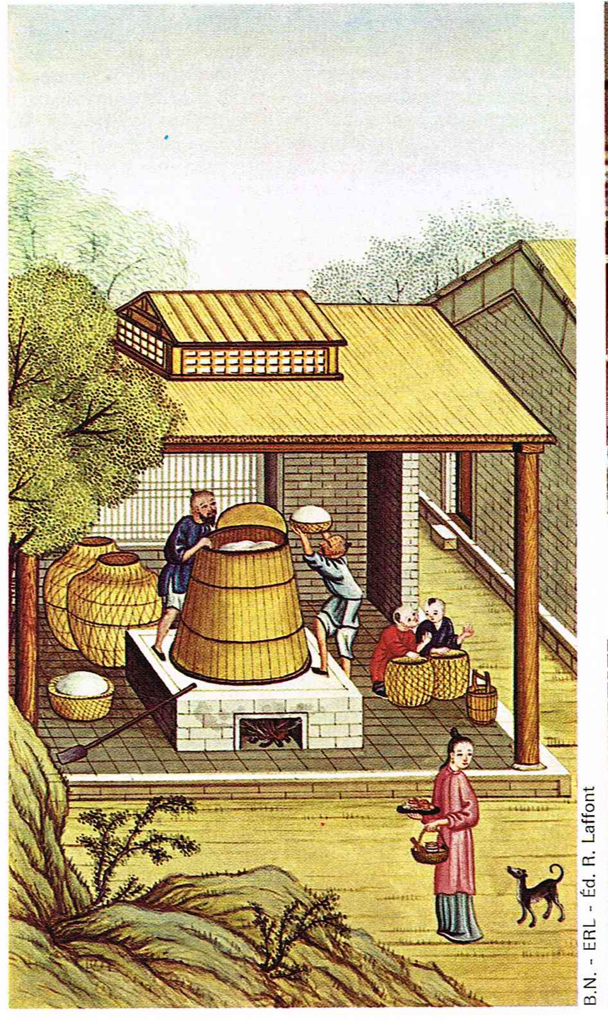


Archives Snark - Thomson CSF

*haute fréquence... La triode fut suivie des tubes multi-électrodes, tétrodes, pentodes, etc. Toutes les bases de la technologie électronique étaient jetées avant la Première Guerre mondiale. Après la Seconde Guerre mondiale, le transistor (œuvre de Bardeen, Brattain, Shockley) donna naissance à l'industrie du semi-conducteur, en plein développement à l'heure actuelle. Le nom de transistor fut bientôt confondu avec l'appareil radiophonique, autonome quant à sa source d'énergie. Son essor dans le domaine public allait donner une nouvelle jeunesse aux stations de radio ; qu'on se souvienne en France de la naissance d'Europe n° 1, modèle suivi par les autres stations. Conséquence politique aussi puisque les gouvernements peuvent atteindre l'auditeur en n'importe quel lieu.*

*Dans chaque foyer, la télévision va ensuite faire pénétrer l'information non seulement par le son, mais aussi par l'image. Image noir et blanc d'abord, puis couleurs, deux procédés (PAL et SECAM) se disputant le marché économique. Si elle fut d'abord réservée à un petit nombre, la télévision est un équipement courant pour un foyer dans le monde industriel.*

*Comme souvent, un conflit armé allait entraîner de multiples développements technologiques, ainsi le radar fut créé simultanément ou presque en Allemagne, en Grande-Bretagne et dans d'autres pays impliqués dans la Seconde Guerre mondiale. Cependant, la technologie centimétrique par génération d'ondes de longueur de 10 cm à l'aide d'un magnétron est essentiellement britannique.*



B.N. - ERL - Éd. R. Laffont




R. Guillemot - Agence TOP

▲ ***Journaux et livres sont deux véhicules anciens d'information. A gauche, une gravure chinoise du XVII[e] siècle représentant la fabrication du papier par cuisson au bain-marie d'une bouillie de bambous. Né en Chine au I[er] siècle de l'ère chrétienne, le papier fut introduit en Occident au cours de différents conflits ; vers 1200, on en fabriquait déjà en France, mais il fallut attendre trois siècles pour voir quelques progrès. A droite, reconstitution d'une salle d'imprimerie datée de 1576, au musée Plantin (du nom de l'imprimeur Christopher Plantin) à Anvers (Belgique) ; bien que des procédés de reproduction aient déjà été employés en Chine, l'imprimerie est datée habituellement de Gutenberg qui l'améliora par l'utilisation des caractères en plomb à la place des caractères en bois.***

*On ne peut parler d'information sans y associer l'informatique. Les ordinateurs ont commencé avec des tubes électroniques (1947) ; c'étaient de petites merveilles... dégageant une forte chaleur (18 000 tubes dans la machine d'Eckert et Marschly). En 1952 apparaissent en France les premières calculatrices électroniques à tubes (Bull et IBM). La technologie des transistors, en 1958-1959, fait passer aux ordinateurs de deuxième génération ; on ne peut plus les employer comme appareils de chauffage. C'est à partir de 1960 que l'ordinateur connaît un essor important ; on remplace de plus en plus les machines mécanographiques. A partir de 1964, c'est la troisième génération : une unité centrale plus performante, développement du logiciel, diversification des périphériques, télétraitement... La technologie fait de nouveaux bonds avec le L. S. I. (Large Scale Integration) qui permet de retrouver des milliers de transistors sur une pastille de support, puis les disques souples (1972). En 1971 est créé le premier microprocesseur, en 1973 le premier micro-ordinateur à microprocesseur. Sur un morceau de silicium de quelques millimètres carrés, on a fabriqué 5 000 à 20 000 transistors.*

*Enfin, on conclura ce survol historique par le journal, véhicule ancien d'information. Journal et livre sont associés à l'imprimerie.*

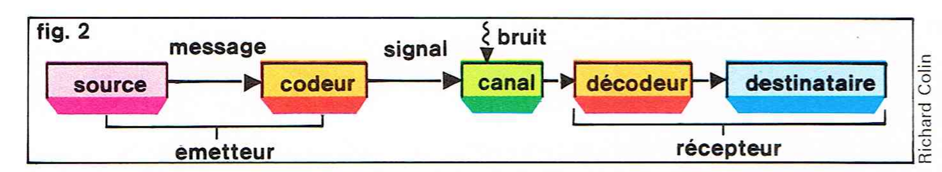
*Bien que des procédés de reproduction aient déjà été employés en Chine, l'imprimerie est datée habituellement de Gutenberg, lequel apporta la fabrication des caractères en plomb et non plus en bois.*

*L'invention de l'imprimerie allait entraîner une propagation des idées si... un support technologique existait. Le papier était né en Chine dans les années 100 de l'ère chrétienne. Puis il fut introduit en Occident à l'occasion des différents conflits, et vers 1200 on en fabriquait en France. Il faudra cependant attendre trois siècles pour voir des progrès dans ce domaine.*

*En Angleterre, Stanphope créait en 1780 une presse entièrement métallique. En 1814, le* Times *était tiré à près de 1 000 feuilles à l'heure en fixant la feuille de papier sur un cylindre. La lithographie naissait dans les mêmes années. La presse à rotative, quant à elle, naissait en 1866 ; le journal* le Petit Journal *en profitait et atteignait des tirages fabuleux pour l'époque. Dernière création qui allait permettre d'accélérer la composition, la linotype était inventée par un employé du* New York Tribune *en 1886. L'impression des journaux actuels utilise la télétransmission et la composition à distance.*

*Le lecteur va maintenant découvrir les différentes technologies associées à l'information.*

*A tout seigneur tout honneur, nous développerons tout d'abord la théorie de l'information de Shannon, conceptualisation mathématique de l'information. Ensuite seront évoqués successivement les sujets suivants : la saisie des données ; la transmission et le codage ; les mémoires et le traitement de l'information ; la détection ; l'informatique ; la radio et la télévision ; le cinéma et la photo ; le papier et la presse ; la conservation de l'information, et quelques technologies de pointe.*




Richard Colin



H. Gloaguen - Viva

▲ *En haut, figure 2 : schéma du principe d'un système de communication (voir développement dans le texte). Ci-dessus, une salle de rédaction du journal italien* **La Gazetta del popolo** *à Turin (Italie) ; dans le système de communication, le journaliste qui explique les faits est le* **codeur.**

▼ *Ci-dessous, le dernier maillon du même exemple de système de communication : le lecteur est à la fois le* **décodeur** *et le* **récepteur** *de l'information.*




Harlingue - Viollet

## *La théorie de l'information*

La théorie de l'information s'attache à de nombreux domaines. Si, au départ, son domaine d'application essentiel était la communication, c'est-à-dire la transmission d'informations, on y adjoint aujourd'hui la théorie du bruit, le filtrage, la modulation, le traitement de l'information ; cependant, des domaines plus marginaux en utilisent les concepts, telles la linguistique, la reconnaissance des formes, la neurophysiologie, etc. Nous ne nous intéresserons dans ce chapitre qu'aux transmissions électriques ou électromagnétiques de communication.

L'histoire de la théorie de l'information débute dans les années 1920 avec Nyquist (1924) et Hartley (1928), qui ont tenté de quantifier le montant d'information transmis d'un système à un autre.

Shannon a publié en 1948, dans le *Bell System Technical Journal,* un article jetant les bases de la théorie moderne. Un deuxième article dans le *Proceedings of IRE* précisait toutes les notions employées aujourd'hui. Bien que de nombreuses démonstrations n'aient été faites qu'après, l'importance des notions et des théorèmes exposés dans ces deux articles n'est plus à souligner (Fernstein, 1953, Mc Millan, 1953, etc.).

Tout ensemble de communication comprend essentiellement trois parties : l'*émetteur,* la *voie de communication* et le *récepteur.* Cependant, il est bien évident que cet ensemble de trois organes peut être représenté par des éléments très variés; ainsi, comme nous l'avons vu, le journal du jour, par exemple, constitue une voie de communication entre l'émetteur qui est le fait produit et le récepteur qui se trouve être le lecteur.

Décrivons maintenant plus complètement un *système de communication* (*fig.* 2).

La *source* ou *source d'information* produit un message devant être transmis au destinataire. Le type de message peut être varié : une suite de caractères alphabétiques (télégraphe), une fonction du temps (signal radio-électrique), une fonction de l'espace et du temps (image télévision noir et blanc), plusieurs fonctions de l'espace et du temps (image télévision couleurs) ou des combinaisons de ces différents types.

Le *codeur* a pour but de transformer le message de manière à faciliter sa transmission par l'organe physique qui suit. Cette transformation est souvent une transformation en signal électrique (téléphone par exemple). Souvent, la fonction du codeur est double : d'une part, il crée un signal dont les caractéristiques sont adaptées pour la transmission, d'autre part il met ce signal sous forme codée de façon à minimiser l'influence de perturbation et donc à augmenter la facilité d'interprétation à destination. Ainsi prenons-nous nous-mêmes l'habitude d'écrire en lettres d'imprimerie la ville destinataire d'un courrier afin de faciliter le travail des services de tri. Cet effort se fait au détriment de la vitesse d'écriture; on verra que tout codage introduit un retard.

Le *canal* est le système de transmission ; ce peut être un câble coaxial, un faisceau hertzien, une plage de fréquences radio, un rayon lumineux, etc.

Le *décodeur* reconstruit le message à partir du signal reçu, réalisant l'opération inverse du codeur.

Le *destinataire* est l'ensemble auquel est destiné le message.

Durant la transmission, des perturbations s'introduisent que l'on désigne sous le vocable de *bruit.* Les perturbations, bruit interstellaire, parasites électriques, etc., sont d'origines diverses, dépendant du système de communication. Bien que ce ne soit pas toujours exact dans la pratique, nous supposerons toutes les sources de bruit concentrées sur le canal. Ce bruit introduit une limitation aux performances du système. Pour lutter contre ce phénomène, on peut répéter les messages, augmenter leur puissance, ce qui se traduit par une hausse du coût de l'ensemble. La théorie de l'information donne une autre arme de lutte, généralement moins coûteuse, le codage (cependant il y a alors perte en rapidité de transmission).

Avant d'explorer plus avant la théorie mathématique de l'information, donnons un exemple simple.

Supposons que la source émette deux messages *a* et *b* de façon indépendante avec la même probabilité 1/2. A cause du « bruit », l'émission de caractères *a* n'entraîne pas forcément la réception de ce même caractère; on a une probabilité de 0,75 de recevoir effectivement *a* mais

aussi 25 chances sur 100 de recevoir *b*. Les valeurs sont inversées si le caractère *b* a été émis. Le canal ne peut transmettre pour des raisons physiques plus d'un caractère par seconde. La probabilité d'erreur est donc :

$$0,5 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,25 = 0,25.$$

Cette valeur étant jugée trop forte, on va essayer de la diminuer. La première idée venant à l'esprit est d'opérer par redondance, et de transmettre *aaa* au lieu de *a*, de même pour le caractère *b*. La règle de décision du décodeur est simple : choisir le caractère le plus présent dans le message de trois caractères reçus comme le caractère émis ; c'est une règle de décision à logique majoritaire. On effectuera une erreur si *b* émis → *bbb* → *aba* reçu, décodé en *a*.

Le calcul de la probabilité d'erreur est facile :

$$\text{P (erreur)} = \text{P (2 caractères faux)} + \text{P (3 caractères faux)}$$
$$= C_3^2\ (0,25)^2\ 0,75 + (0,25)^3 = 0,156 < 0,25.$$

La probabilité d'erreur a donc été diminuée, mais en contrepartie il faut avec ce nouveau système 3 secondes pour transmettre un caractère.

Un des théorèmes fondamentaux de la théorie de l'information, le *théorème de Shannon*, montre d'ailleurs que, pour obtenir une grande fiabilité, il n'est pas nécessaire de réduire le taux de transmission à 0.

## *Définition de la quantité d'information*

Les messages émis par une source ont une signification ; cet aspect n'est pas considéré par la théorie de l'information. Le seul fait important est la sélection parmi un ensemble de possibilités du message. Le terme *information* est abstrait, relatif à une quantité difficile à mesurer, aussi quantifie-t-on le contenu possible d'un message et non le contenu réel. Si le nombre de messages possibles est fini et si tous les messages sont équiprobables, ce nombre ou toute fonction monotone de ce nombre peut être pris comme mesure de la quantité d'information. Ce fut Hartley qui le premier proposa une unité logarithmique. Ainsi, pour une source à M messages équiprobables, la quantité d'information apportée par un quelconque des messages sera log M.

Raisonnons maintenant sur une source plus complexe de M messages où un message $m_i$ a une probabilité $p_i$ de se produire $\left(\sum_{i=1}^{M} p_i = 1\right)$. La définition précédente s'entend facilement à partir des quelques considérations suivantes :

— Plus un message est improbable, plus sa réalisation apporte d'information. Un message certain, donc attendu à coup sûr, n'apporte aucune information. L'information apportée par un message doit donc être une fonction de l'inverse de la probabilité.

— La fonction information à définir doit être une fonction additive. L'information apportée par deux messages indépendants doit être la somme des informations de chaque message.

— Si un message A implique un message B ($A \subset B$), le fait que B soit réalisé doit diminuer l'incertitude sur la réalisation de A.

De ces trois propriétés (en fait, une axiomatique plus générale) est venue l'idée de prendre comme définition de l'information apportée par le message $m_i$ (ou de l'incertitude levée) la quantité notée $I\ (m_i)$ :

$$I\ (m_i) = \log \frac{1}{p\ (m_i)} = -\log p\ (m_i)$$

$p\ (m_i)$ est la probabilité d'apparition du message $m_i$.

Dans le cas de M messages équiprobables, on retrouve la définition proposée précédemment $\left(\log M = -\log \frac{1}{M}\right)$.

La base du logarithme indique l'unité choisie :

— base 2 : l'information se mesure en *bits* (binary unit) ;

— base *e* : l'information se mesure en *nats* (natural unit) ;

— base 10 : l'information se mesure en *decits* (decimal unit) ou *hartleys*.

Sauf indication contraire, nous utiliserons le bit comme unité d'information.

Ainsi, l'information apportée par un message issu d'une source de deux messages équiprobables est de :

$$\log \frac{1}{2} = 1 \text{ bit.}$$

Suivant maintenant les travaux originaux de Shannon, nous distinguerons trois systèmes de communication :

— Système discret dans lequel message et signal sont constitués d'une suite finie de caractères. Un exemple simple est le télégraphe ; le message est une suite de caractères alphabétiques, le signal une suite de points, tirets et espaces.

— Système continu, où message et signal sont des fonctions continues du temps. Ainsi, le système de télévision est un système continu.

— Système mixte, combinaison des deux précédents, telle la méthode PCM (Pulse Code Modulation) de transmission de la parole.

## *Canal discret sans bruit*

Une source discrète est une source à nombre fini de messages, ainsi un télétype. Nous associons à chaque message $m_i$ sa probabilité $p_i$.

Un type simple de source est une source sans mémoire : chaque message est indépendant de tout message émis antérieurement.

Prenons l'exemple suivant extrait de l'article de Shannon. Soit une source à cinq messages A, B, C, D, E équiprobables (probabilité commune 0,2), un exemple de suite obtenue peut être BDCBCECCCADCBDDAAECEEA.

Si les cinq messages ont pour probabilités respectives 0,4, 0,1, 0,2, 0,2, 0,1, on pourra observer une suite du type AAACDCBDCEAADADACEDA.

Les deux sources précédentes étaient sans mémoire ; pour une source quelconque, un message est émis suivant une loi de probabilité dépendant des messages précédemment émis. Reprenons l'exemple d'une source de trois messages (A, B, C) en supposant que l'arrivée d'un message dépende du précédent (source à mémoire une unité de temps) et dressons le *tableau des probabilités :*

| $p\ (m_i, m_j)$ | A | B | C |
|---|---|---|---|
| A | 0 | $\frac{4}{15}$ | $\frac{1}{15}$ |
| B | $\frac{8}{27}$ | $\frac{8}{27}$ | 0 |
| C | $\frac{1}{27}$ | $\frac{4}{135}$ | $\frac{1}{135}$ |

$$p\ (m_i/m_j) = \frac{p\ (m_i m_j)}{p\ (m_j)}$$

$$p\ (m_j) = \sum_i p\ (m_i m_j)$$

Les formules ci-dessus permettent de trouver le *tableau des probabilités conditionnelles :*

| $p\ (m_i/m_j)$ | A | B | C |
|---|---|---|---|
| A | 0 | 4/5 | 1/5 |
| B | 1/2 | 1/2 | 0 |
| C | 1/2 | 2/5 | 1/10 |

Un exemple type de sortie de cette source peut être : ABBABABABABABABBBABBBBBAB.

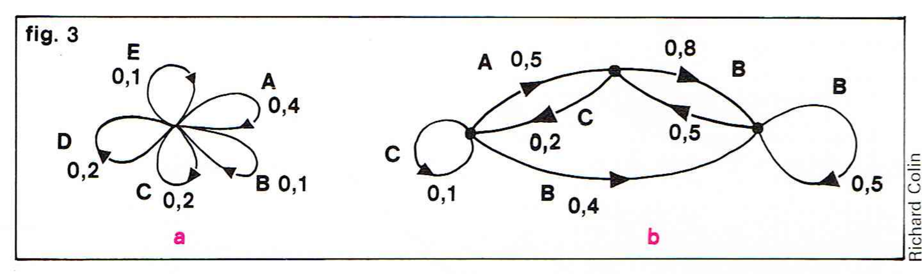
Avec de telles sources, on peut envisager de reconstituer des langages naturels. Ainsi Shannon tente-t-il de reconstituer l'anglais à l'aide de plusieurs approximations. Au départ, on a 27 caractères (26 lettres et l'espace).

— Première approximation ; tous les caractères sont équiprobables :

XFOML RXKMRJFFJUJ ZLPWXFWKCYJ.

— Deuxième approximation ; à chaque caractère est associée une probabilité égale à sa fréquence mesurée dans la langue anglaise (E a une probabilité de 0,12, W de 0,02) : OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NBNESEBYA TH EEI

— Troisième approximation ; approximation par groupe de 2 lettres (une fois une lettre sortie, la suivante est choisie suivant la probabilité qu'elle a de suivre la première ; cette méthode fait donc appel aux probabilités conditionnelles) : ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTURE ST BE S DEAMY ACKIN.




Richard Colin

▲ *Figure 3 : exemples de graphes correspondant à deux types de sources dans un système discret ; a) source sans mémoire à 5 messages (A, B, C, D, E) de probabilités respectives 0,4, 0,1, 0,2, 0,2, 0,1 ; b) source à mémoire à 3 messages A, B, C dont les probabilités conditionnelles ont été données dans le tableau page 11.*

▼ *Le centre et l'antenne d'émission de télévision de Besançon (exemple d'émetteur dans le cas d'un système de communication).*

Archives Snark - Thomson CSF

— Quatrième approximation ; la même technique est utilisée en travaillant sur des groupes de 3 lettres : IS NO IST LAT WHE CRATICT FROURE BIRS GRUCID PONDEMONDE...

— Cinquième approximation ; approximation par des mots. Des mots sont tirés au hasard, chacun ayant sa probabilité propre d'apparition dans la langue anglaise : REPRESENTING AND SPEEDILY IS AN GOOD APT OR COME CAN DIFFERENT.

— Sixième approximation ; on introduit les probabilités conditionnelles entre deux mots : THE HEAD AND IN FRONTAL ATTACK ON AN ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER.

L'approximation de la langue anglaise s'améliore du premier au sixième essai. Il est évident que, si on continuait à compliquer la source, on s'approcherait de plus en plus de la langue.

Une source dont les messages sont issus indépendamment les uns des autres est dite *source sans mémoire*. Une *source à mémoire* dont le comportement ne dépend pas du temps est dite *homogène*. Des sources à mémoire peuvent être représentées par des graphes. Les nœuds représentent les états de la source et les pondérations des arêtes les probabilités de passage d'un message à l'autre (sur l'arête est aussi indiqué le message émis). La *figure* 3 donne des exemples de graphes.

Les sources à mémoire présentant des analogies avec les processus de Markov sont souvent appelées *sources de Markov*.

### Information moyenne-entropie

Nous avons défini précédemment l'information associée à un message ; c'est une notion absolue. Pour une source d'information sans mémoire dont chaque message $m_i$ a pour probabilité $p\ (m_i)$, il est intéressant de chiffrer l'information moyenne apportée. Cette quantité, appelée *entropie*, est définie naturellement de manière probabiliste comme l'espérance mathématique de la variable aléatoire « mesure de l'information apportée par un message ». On notera conventionnellement cette quantité

$$\mathrm{H}\ (p\ (m_i) \ldots p\ (m_n)) \text{ ou H.}$$

$$\mathrm{H}\ (p\ (m_i) \ldots p\ (m_n)) = -\sum_{i=1}^{n} p\ (m_i) \log p\ (m_i)$$

Par convention, $p\ (m_i) \log p\ (m_i) = 0$ si $p\ (m_i) = 0$.

Cette quantité joue un grand rôle en théorie de l'information ; son nom d'entropie fait penser au concept de thermodynamique, et il est intéressant de voir la liaison existant entre les deux. Il y a en effet analogie formelle entre la formule ci-dessus et celle de Boltzmann concernant l'entropie thermodynamique :

$$\mathrm{S} = -k \sum_i p\ (i) \operatorname{Log} p\ (i) \qquad \text{(en logarithme népérien)}$$

Les $p\ (m_i)$ de la formule de Shannon sont définis comme des probabilités, alors que les $p\ (i)$ de la formule de Boltzmann sont définies comme suit : tout système peut se trouver dans un grand nombre d'états $i$, chacun d'entre eux étant précisé par une valeur de l'énergie $e_i$. Prenons l'exemple d'un gaz ; on le caractérise par des grandeurs macroscopiques (volume, masse de gaz, température) alors qu'il est composé de molécules repérables dans l'espace par leurs coordonnées et leur quantité de mouvement. Ces dernières grandeurs n'étant pas mesurables, il faut trouver comment les relier aux grandeurs macroscopiques. L'état microscopique d'un système ne pouvant être connu, chaque grandeur mesurée est considérée comme moyenne sur l'ensemble des états microscopiques possibles. A chaque état microscopique $i$ on relie une probabilité $p\ (i)$. Dans l'étude des machines thermiques, on définit l'entropie par la formule :

$$\Delta \mathrm{S} = \frac{\Delta \mathrm{Q}}{\mathrm{T}}$$

où $\Delta$S est la variation d'entropie du système, $\Delta$Q la variation de chaleur et T la température absolue du système.

On montre en thermodynamique statistique que l'entropie est liée aux probabilités des micro-états par :

$$\mathrm{S} = -k \sum_i p\ (i) \operatorname{Log} p\ (i)$$

$k = 1{,}38 \times 10^{-16}$ erg/degré ; c'est la constante de Boltzmann.

Autrement dit, dans son sens thermodynamique, l'entropie est une mesure du désordre d'un système. L'entropie d'un système gazeux où les molécules peuvent avoir de grandes quantités de mouvement aussi bien que des faibles est plus grande que celle d'un système où seraient placées dans deux enceintes différentes les molécules à grande quantité de mouvement et les autres.

En représentant un micro-état comme un message d'une source, on peut dire que la définition de la thermodynamique statistique représente l'information moyenne qu'on a sur l'état microscopique du système :

$$\mathrm{H} = -\Sigma p\ (i) \log_2 p\ (i) = -\log_2 e\ \Sigma p\ (i) \operatorname{Log} p\ (i)$$

Donc $\mathrm{S} = k\mathrm{H}/\log_2 e$.

Pour continuer la discussion, il est bon de faire un retour sur les principes de la thermodynamique. Le premier principe établissait, rappelons-le, l'équivalence des formes d'énergie. Le deuxième principe, ou principe de



Archives Snark - Thomson CSF

▲ *Un exemple d'émetteur-récepteur : la salle de contrôle de l'aéroport de Francfort (R. F. A.).*

Carnot, établit une qualité des différentes formes d'énergie. Soit U l'énergie interne totale du système, alors toute variation d'énergie $\Delta U$ est la somme de deux termes : $-\Delta W$, qui indique une variation de travail disponible, et $\Delta Q$, qui indique une variation de chaleur emmagasinée, soit $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$.

Le signe — associé à W indique que le travail fourni augmente, donc que le travail disponible diminue. Dans un système isolé ($\Delta U = 0$), on retrouve le premier principe, c'est-à-dire $\Delta W = \Delta Q$ (toute production de travail est production de chaleur).

Cependant, on peut remarquer que la transformation est unilatérale : transformation du travail en chaleur et non réciproquement dans un système isolé. Le principe de Carnot peut alors s'exprimer ainsi : $\Delta Q > 0$. La quantité $\Delta Q$ n'étant pas une différentielle totale, on a introduit la quantité $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ qui présente cette propriété. La relation ci-dessus est donc équivalente à $\Delta S \cdot T > 0$. Donc l'entropie d'un système isolé ne peut que croître ; le maximum est atteint dans le cas de transformation réversible, c'est-à-dire à l'état d'équilibre.

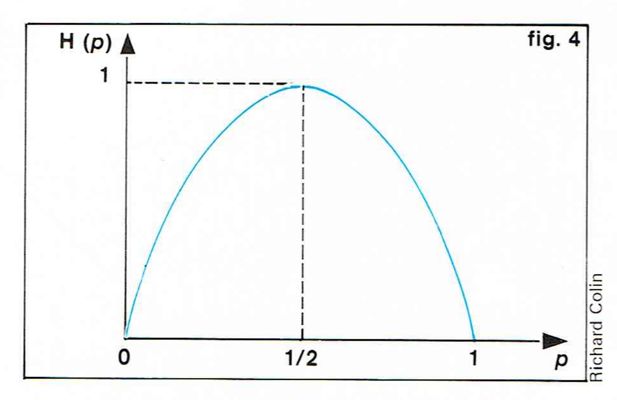
En revenant à la définition de l'entropie donnée par Boltzmann, l'entropie est maximale dans le cas d'équiprobabilité des micro-états. Donc le désordre accroît l'entropie ; l'entropie est un indice du degré d'ordre microscopique de l'énergie du système. La chaleur correspondant à l'état microscopique le plus dégradé (déplacement désordonné de molécules et de charges), le deuxième principe ($\Delta S > 0$) traduit l'évolution d'un système isolé vers le plus grand désordre au niveau microscopique : le degré d'ordre microscopique ne peut que décroître lors des transformations énergétiques d'un système isolé. Brillouin traduit alors la discussion précédente : « L'entropie est en général considérée comme exprimant l'état de désordre d'un système physique. D'une façon plus précise, on peut dire que l'entropie mesure le manque d'information sur la véritable structure du système. Ce manque d'information implique la possibilité d'une grande variété de structures microscopiques distinctes qui sont en pratique impossibles à distinguer les unes des autres. Puisque l'une d'elles peut exister réellement à un moment donné, le manque d'information correspond à un désordre réel dans les degrés de liberté cachés. »

L'écriture de la formule de Boltzmann dans l'esprit de Shannon permet de mesurer l'information moyenne par micro-état qu'aurait un observateur si l'observation était possible. Brillouin associe alors l'entropie à une incertitude moyenne et établit le lien entre entropie et information de la façon suivante. Soit $N_0$ le nombre d'états possibles d'un système. Avant toute précision sur le système, la quantité d'information est nulle. Si la définition du système conduit à un des $N_0$ cas possibles, la quantité d'information moyenne vaut $\log_2 e \operatorname{Log} N_0$ en prenant pour hypothèse l'équiprobabilité des états. Pour une définition moins complète, le nombre d'états possibles est réduit de $N_0$ à $N_1$ ($N_1 < N_0$), la quantité d'information obtenue est $\log_2 e (\operatorname{Log} N_0 - \operatorname{Log} N_1) = I$. L'entropie du système était au départ $S_0 = k \operatorname{Log} N_0$, elle devient $S_1 = k \operatorname{Log} N_1$. Ainsi, si on exprime l'information en unités thermodynamiques : $I = S_0 - S_1$. I correspond à une diminution de l'entropie. Cette diminution d'entropie apparaît si on constitue l'ensemble « observateur-système ». Avant la mesure, le système et l'appareil de mesure ont respectivement des entropies $S_{01}$ et $S_{02}$ ; après la mesure, les entropies sont respectivement $S_{11}$ et $S_{12}$. D'après le principe de thermodynamique décrit plus haut, l'entropie de l'ensemble ne peut qu'avoir augmenté, donc $S_{11} + S_{12} > S_{01} + S_{02}$. On peut très facilement expliquer ce phénomène par le fait que l'appareil de mesure a besoin d'énergie pour effectuer la mesure : on a donc $S_{01} - S_{11} > 0$ et $S_{02} - S_{12} > 0$. Or $S_{11} = S_{01} - I$.

Brillouin introduit alors l'entropie négative *(néguentropie)* pour exprimer que l'information extraite entraîne une diminution de l'entropie du système ou une augmentation de la néguentropie. L'information ne peut être obtenue qu'en prenant de la néguentropie à l'appareil de mesure. Donc la quantité d'information est reliée à une variation d'entropie avec changement de signe. Si on suit ce raisonnement, il n'y a pas d'identité entre les formules de Shannon et de Boltzmann : toute information entraîne une variation négative d'entropie.

Présentons maintenant le *paradoxe du démon de Maxwell* qui a fait couler beaucoup d'encre. Mawxell avait conçu un système constitué d'une boîte divisée en deux compartiments A et B séparés par une cloison étanche au gaz et manœuvrable sans frottement. Au début de l'expérience, les deux compartiments contiennent certaines quantités de gaz à la même pression et à la même température. La commande de la cloison (ouverture et fermeture) est faite par un « *démon* » capable de discerner individuellement les molécules. Lorsque le démon voit approcher de la porte une molécule rapide venant de A, il la laisse passer en B et agit de même pour une molécule lente qu'il laisse aller de B vers A. Ainsi, sans dépense de travail, B voit sa température augmenter et A la voit diminuer. Le système a donc une entropie plus faible et on peut

▶ *Figure 4 : courbe de l'entropie* H *en fonction de la probabilité* $p$ *d'un des éléments d'un alphabet à deux caractères.*




faire ainsi fonctionner une machine thermique entre les deux compartiments, ce qui contredit le deuxième principe de la thermodynamique.

L'explication donnée par Brillouin est la suivante : le démon ne peut trier les molécules que s'il les « voit »; cette action s'accompagne d'absorption d'énergie (interaction lumière-molécule), d'où un accroissement d'entropie $\Delta S$. Le second principe n'est donc pas contredit : l'information acquise correspond à une diminution du nombre des possibilités, donc à une augmentation de la néguentropie du système; cette néguentropie donne la diminution d'entropie de la séparation entre les deux gaz. Cette diminution d'entropie (due à l'acquisition d'information sur la vitesse des molécules) est compensée par l'augmentation $\Delta S$ qui accompagne l'échange d'énergie entre le démon et le reste du système. Le démon transforme une partie de l'entropie gagnée en information, transformée ensuite en néguentropie lors de la séparation en gaz chaud et froid :

néguentropie → information → néguentropie

Le bilan final est une perte de néguentropie pour l'ensemble du système. En conclusion, et de façon concise, il faut fournir un travail pour donner au démon les informations relatives à la vitesse des molécules; cela représente le prix payé pour la diminution de l'entropie.

On peut donc, comme certains auteurs, considérer l'entropie comme une mesure d'ignorance : ainsi a-t-on pu définir une axiomatique de thermodynamique statistique en partant de la quantité d'information transmise par un système à un observateur effectuant des mesures. La thermodynamique apparaît alors comme un développement de la théorie de l'information.

Revenons donc à la théorie de l'information et à sa définition de l'entropie d'une source. Si la source est constituée par deux messages $m_1$ et $m_2$ équiprobables, il y a donc un bit d'incertitude moyenne. Si tous les caractères alphabétiques (26 lettres et le séparateur) étaient équiprobables dans notre langue, la lecture d'une lettre entraînerait une information moyenne de $\log_2 27 = 4{,}75$ bits. Le code à deux caractères ou code binaire étant très employé, il convient de connaître l'allure de la courbe entropie tracée en fonction de la probabilité $p$ d'un des caractères (*fig.* 4).

$$H = H(p) = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p)$$

Cette courbe passe par un maximum égal à 1 lorsque $p$ vaut 1/2, c'est-à-dire lorsque les deux caractères sont équiprobables. Ce résultat est général : pour $n$ caractères, $H \leqslant \log_2 n$, le maximum étant atteint lorsque tous les caractères sont équiprobables.

Remarquons une autre propriété générale : H est toujours une fonction à valeurs positives. Par convention aussi, on désignera par H (X) l'entropie associée à une source X, bien que H ne soit pas fonction de X. De la même façon, on peut définir des entropies pour deux ou plusieurs sources. Ainsi, supposons deux sources de messages : X émettant $x_1 \dots x_m$, Y émettant $Y_1 \dots Y_n$; l'entropie de X sera désignée symboliquement par :

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{m} p(x_i) \log p(x_i);$$

de même H (Y) pour la source Y. On peut définir la loi de probabilité conjointe $p(x_i, y_j)$ d'avoir les deux messages $x_i$ et $y_j$. On définit alors l'entropie conjointe de deux sources X, Y par :

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j) \log p(x_i, y_j)$$

Ainsi :

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j) \log \left[ \sum_{j=1}^{n} p(x_i, y_j) \right]$$

Il est facile de montrer que :

$$H(X, Y) \leqslant H(X) + H(Y)$$

L'égalité $H(X, Y) = H(X) + H(Y)$ n'a lieu que si les deux sources sont indépendantes

$$(p(x_i, y_j) = p(x_i) \cdot p(y_j)).$$

Les définitions précédentes peuvent se généraliser à $k$ sources $X_1 \dots X_k$.

On définit également d'autres entropies : les *entropies conditionnelles*. Rappelons qu'on définit la probabilité conditionnelle du message $y_j$ produit par Y, sachant que X a émis le message $x_i$, par :

$$p(y_j, x_i) = \frac{p(y_j, x_i)}{p(x_i)} \qquad p(x_i) \neq 0$$

L'entropie conditionnelle sur le résultat de Y, sachant que X a émis $x_i$, se définit par :

$$H(Y/X = x_i) = -\sum_{j=1}^{n} p(y_j/x_i) \log_2 p(y_j/x_i)$$

$H(Y/X = x_i)$ est une fonction du résultat de X, $x_i$, c'est donc une quantité aléatoire. L'interdépendance des deux sources X et Y est mieux traduite par l'*espérance mathématique* de cette quantité que l'on note H (Y/X) :

$$H(Y/X) = E(H(Y/X = x_i)) = $$

$$-\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} p(x_i y_j) \log p(y_j/x_i)$$

Cette dernière quantité exprime l'information apportée sur Y lorsqu'on connaît le message émis par X : il ne faut pas la confondre avec H (Y), qui donne l'information sur Y sans se préoccuper de la source X.

Ces quantités sont liées entre elles; il est facile de montrer que :

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y)$$

L'entropie conditionnelle H (Y/X) est majorée par H (Y), l'égalité des deux quantités n'ayant lieu que si les deux sources X et Y sont indépendantes.

### Codage

Examinons maintenant comment ces notions peuvent être utilisées dans un problème de codage. A chacun des $k$ messages $m_i$ de la source on associe un mot code $S_i$ composé de $n_i$ caractères issus d'un alphabet de dimension $c$. Un alphabet très utilisé est l'alphabet binaire, dont on désigne symboliquement les caractères par {0, 1}. Chaque message ayant une probabilité $p(m_i)$, la longueur moyenne $\bar{n}$ des mots du code employé est naturellement définie par :

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^{k} p(m_i)\, n_i$$

Remarquons immédiatement que $\bar{n}$ est nécessairement borné inférieurement. En effet, l'alphabet à $c$ caractères peut permettre de coder au maximum $c^{\bar{n}}$ messages avec des mots de longueur $\bar{n}$. L'entropie H de la source est donc majorée :

$$H \leqslant \log_2 c^{\bar{n}}$$

Donc : $\bar{n} \geqslant \dfrac{H}{\log_2 c}$; si $c = 2$ $\quad \bar{n} \geqslant H$.

Ainsi, l'entropie de la source est la longueur minimale des mots d'un code binaire. Si le canal transmet D lettres par unité de temps, on définit le débit d'information R par :

$$R = D \frac{H}{\bar{n}} \text{ bits/seconde}$$

L'efficacité d'un code est définie par le rapport $\eta$ :

$$\eta = \frac{\overline{n}_{\min}}{\overline{n}} = \frac{H}{\overline{n} \log_2 c}$$

$1 - \eta$ traduit donc la *redondance* d'un codage. On peut alors énoncer le théorème de Shannon pour les transmissions sans bruit : il existe toujours un code déchiffrable (deux textes distincts ont des codages distincts) pour lequel la longueur moyenne des mots est aussi voisine que l'on veut de la borne inférieure indiquée ci-dessus.

Prenons un exemple fourni par Shannon dans son article original. Soit une source à quatre messages $m_1, m_2, m_3, m_4$ de probabilités respectives 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,125 qu'on désire coder avec un alphabet binaire. L'entropie de la source vaut :

$$H = -(0{,}5 \log 0{,}5 + 0{,}125 \log 0{,}125 + 0{,}125 \log 0{,}125 + 0{,}25 \log 0{,}25) = 1{,}75 \text{ bit}$$

La longueur moyenne minimale du codage est donc 1,75. Shannon propose alors la technique suivante :

1) Ranger les messages par ordre de probabilité décroissante $p(m_1) \geqslant p(m_2) \geqslant \ldots \geqslant p(m_k)$. Soit

$$P_s = \sum_{i=1}^{s-1} p(m_i)$$

la probabilité cumulée jusqu'au $(s-1)$-ième message.

2) Associer alors au message $m_1$ le mot binaire obtenu en écrivant $P_s$ en binaire, ce développement étant tronqué à la longueur $n_s$ déterminée par :

$$\log_2 \frac{1}{p(m_s)} \leqslant n_s \leqslant \log_2 \frac{1}{p(m_s)} + 1$$

Ainsi, les messages de faible probabilité ont les mots-codes les plus longs. Cette règle permet d'avoir des mots-codes tous différents, et donc permet la propriété de déchiffrabilité. Le calcul de $\overline{n}$ pour le code ainsi proposé montre que : $H \leqslant \overline{n} \leqslant H + 1$.

Cette méthode a été aussi proposée par Fano et porte le nom de *codage de Shannon-Fano*. Appliquons-la à l'ensemble de messages proposé. Ainsi :

$p(m_1) = 0{,}5$ $n_1 = 1$ donc $m_1$ est codé par 0
$p(m_2) = 0{,}25$ $n_2 = 2$ donc $m_2$ est codé par 10
$p(m_3) = 0{,}25$ $n_3 = 3$ donc $m_3$ est codé par 110

De même, $m_4$ est codé par 111.
La longueur moyenne des mots-codes est donc

$$1 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}25 + 3 \cdot 0{,}25$$

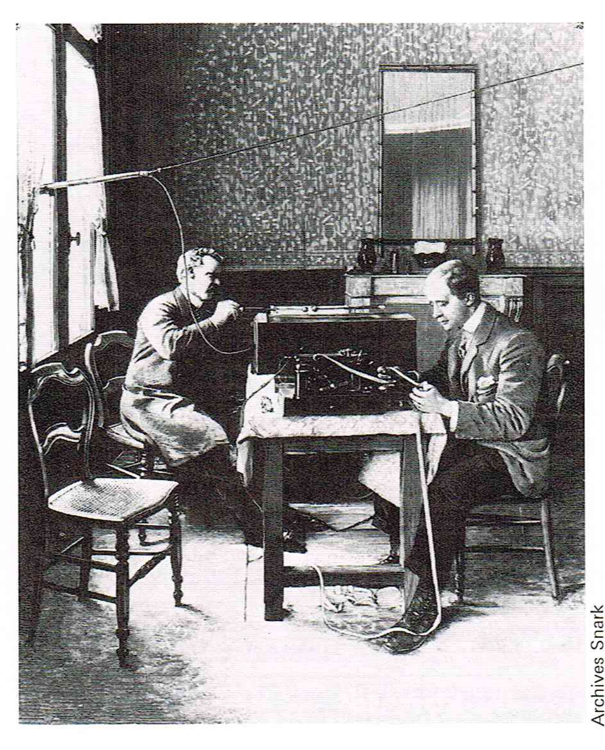
soit 1,75.

Une autre application du théorème de Shannon est l'adaptation d'une source à un canal. Ce problème est analogue à celui de l'adaptation d'un générateur à une charge pour transmission du maximum de puissance dans un réseau électrique. Prenons l'exemple d'un canal binaire ayant une capacité de transmission maximale de $c$ bits par seconde. Ce canal doit être relié à une source d'entropie H ($< 1$) débitant D caractères par unité de temps. Supposons que ce débit soit excessif ($D > c$) mais que le taux d'émission R en bits par seconde de la source vérifie $R < c$ ($R = DH$). Si on introduit un codeur dont la longueur moyenne des mots est $\overline{n}$, on réduit le débit de la source, et ainsi on l'adapte au canal ; le débit devient $D\overline{n}$. D'ailleurs, d'après le théorème de Shannon, on peut trouver un codage dont $\overline{n}$ est aussi proche que l'on désire de H.

Shannon avait d'ailleurs formulé son théorème d'une autre manière en disant qu'on peut trouver un codage pour une source d'entropie H bits par symbole reliée à un canal de capacité $c$ bits par seconde de manière à transmettre au maximum au taux de $\frac{c}{H}$ symboles par seconde. En aucun cas, ce taux de transmission ne peut être dépassé. Ces deux énoncés sont similaires.

### *Canal discret avec bruit*

Nous allons maintenant examiner le cas où le signal peut être perturbé par du bruit lors de la transmission dans le canal, autrement dit, où le signal reçu n'est pas toujours identique au signal émis.



Archives Snark

◀ ***Un exemple de transmission dans le cadre d'un canal discret : la réception d'un télégramme d'Angleterre en 1898 au poste d'expérience de Wimereux (Bibliothèque nationale).***

On peut distinguer deux cas.

Le signal reçu est une fonction déterminée du signal émis, c'est-à-dire qu'à deux transmissions distinctes du même signal correspond le même signal reçu. Ce phénomène s'appelle la *distorsion*, et on peut très facilement le combattre si l'opération produisant les déformations du signal émis a une inverse unique et qu'on la connaisse.

Nous ne nous intéresserons pas à ce cas mais au deuxième où le signal reçu est une fonction statistique du signal émis. On introduit donc un processus stochastique, le bruit $n(t)$ (voir *fig.* 2) traduisant tous les phénomènes incontrôlés se produisant dans la transmission. Nous représenterons par X l'entrée du canal et par Y sa sortie. On peut caractériser ces grandeurs par leur entropie H (X) et H (Y). S'il n'y a pas de bruit, $H(Y) = H(X)$. S'il y en a, on peut indiquer sa présence en faisant appel à l'entropie conjointe H (X, Y) et aux entropies conditionnelles H (Y/X) et H (X/Y). Rappelons la relation :

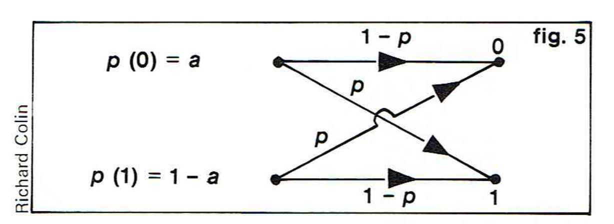
$$H(X, Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y)$$

Nous allons maintenant essayer de formuler l'information transmise par un canal marqué par du bruit. Partons de l'exemple simple d'une source à deux caractères $\{0, 1\}$ équiprobables que l'on transmet au taux de 1 000 symboles par seconde. Le bruit modifie le signal transmis : 1 % des signaux est reçu en moyenne de manière incorrecte (un 0 pour un 1 et réciproquement). Le taux de transmission de l'information est certainement inférieur à 1 000 bits par seconde à cause du bruit. On ne peut dire non plus que ce taux est de 990 bits par seconde, puisqu'on ne fait qu'intégrer la valeur moyenne du nombre d'erreurs. Ce raisonnement est faux. Poussons-le à l'extrême et supposons que le bruit soit particulièrement important pour que les caractères reçus soient complètement indépendants des caractères émis (on a une probabilité de 0,5 de recevoir 0 quel que soit le caractère émis, de même pour recevoir 1). Dans ces conditions, la moitié en moyenne des caractères reçus est incorrecte, et on dirait que le système transmet 500 bits par seconde, alors que réellement aucune information ne circule !

La meilleure correction à apporter au terme H (X) qui donne l'information moyenne mise à l'entrée du canal est la quantité d'information moyenne perdue lors de la transmission. Cette quantité est mesurée par l'entropie conditionnelle sur X connaissant Y : elle représente bien l'information moyenne sur la source que l'on a lorsqu'on connaît le message reçu. C'est ainsi qu'on définit l'information transmise I (X ; Y) ou information mutuelle entre X et Y par :

$$I(X; Y) = H(X) - H(X/Y)$$

▶ *Figure 5 : représentation schématique du canal binaire symétrique* **(B. S. C.,** *du nom anglais Binary Symmetric Channel) ; les probabilités des caractères d'entrée sont : p (0) = a et p (1) = 1 — a.*




H (X/Y) est parfois appelée *équivoque*. L'équivoque mesure la perte d'information due au bruit. On peut donner deux propriétés de I (X; Y) :

— I (X; Y) est toujours positive;

— I (X; Y) est une fonction symétrique.

$$I(X;Y) = I(Y;X) = H(X) - H(X/Y) = H(Y) - H(Y/X)$$

Calculons I (X; Y) pour l'exemple évoqué ci-dessus :

$$H(X/Y = 0) \sum_{i=0}^{1} p(X_i = i/Y = 0) \log p(X = i/Y = 0)$$

Il est facile de montrer que $P(X = 0/Y = 0) = 0{,}99$
$P(X = 1/Y = 0) = 0{,}01$

Donc $H(X/Y = 0) = -0{,}99 \log_2 0{,}99 - 0{,}01 \log_2 0{,}01$.

De même pour H (X/Y = 1) et

$$H(X/Y) = \sum_{i=0}^{1} p(Y = i)\, H(X/Y = i) =$$

$-(0{,}99 \log_2 0{,}99 + 0{,}01 \log_2 0{,}01) = 0{,}0808$ bit/caractère soit donc 80,8 bits/seconde. L'information transmise par seconde par le canal est donc :

$$1\,000 - 80{,}8 = 919{,}2 \text{ bits par seconde}$$

Dans le cas du canal « dégénéré »

$$P(Y = 0/X = 1) = P(Y = 0/X = 0) = 0{,}5$$

on trouve :
$H(Y/X) = -0{,}5 \log_2 0{,}5 - 0{,}5 \log_2 0{,}5 = 1$ bit/caractère donc $I(X;Y) = 0$ ; on retrouve le résultat attendu.

Un exemple classique est le canal binaire symétrique (B. S. C., de son nom anglais Binary Symmetric Channel) où les mots de l'entrée et de la sortie sont pris dans l'alphabet $\{0, 1\}$. Ce canal peut se définir par la donnée des probabilités de transition ($p(1/1) = p(0/0) = 1 - p$ ; $p(1/0) = p(0/1) = p$) et celle des caractères d'entrées ($p(0) = a$ ; $p(1) = 1 - a$). Il peut se représenter schématiquement comme on l'a indiqué sur la *figure* 5.

Calculons à titre d'exemple pour ce canal l'information transmise I (X, Y). Soit $p(0) = a$ et $p(1) = 1 - a$ les probabilités *a priori* des caractères 0 et 1.

$$p(Y = 0) = a(1 - p) + (1 - a)\,p = a'$$
$$p(Y = 1) = 1 - a'$$
$$H(Y) = -a' \log a' - (1 - a') \log (1 - a')$$
$$H(Y/X = 0)$$
$$= -p(0/0) \log p(0/0) - p(1/0) \log p(1/0)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$
$$H(Y/X = 1)$$
$$= -p(0/1) \log p(0/1) - p(1/1) \log p(1/1)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$
$$H(Y/X)$$
$$= p(X = 0)\, H(Y/X = 0) + p(X = 1)\, H(Y/X = 1)$$
$$= -p \log p - (1 - p) \log (1 - p)$$
$$= I(X, Y) = -a' \log a' - (1 - a') \log (1 - a')$$
$$+ p \log p + (1 - p) \log (1 - p)$$

Puisque $p$ est fixé par la physique du canal, I (X, Y) apparaît comme la fonction de $a'$, probabilité de recevoir 0, c'est-à-dire comme une fonction de la probabilité d'émission de 0. Cette fonction est paramétrée par la probabilité $p$ de recevoir un caractère erroné. Un calcul simple montre que I (X, Y) en tant que fonction de $a$ est maximal si $a = \frac{1}{2}$, ce maximum valant :

$$I_{max}(X, Y) = 1 + p \log p + (1 - p) \log (1 - p)$$

I (X, Y) représente le maximum d'information transmissible. Si le canal est sans bruit, $I_{max}(X, Y) = 1$ bit.

Prenons des exemples de canaux bruyants :

$p = 0{,}1$ $\quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}47)$ bit
$p = 0{,}05$ $\quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}29)$ bit
$p = 0{,}01$ $\quad I_{max}(X, Y) = (1 - 0{,}08)$ bit

L'importance de la valeur du paramètre $p$ est clairement apparente sur cet exemple.

Le résultat trouvé à propos d'un canal B.S.C. se généralise ; on appelle capacité C d'un canal le maximum d'information transmissible, c'est-à-dire le maximum de la quantité I (X; Y), considéré comme fonction des probabilités des caractères d'entrée. Ces probabilités sont en effet les seules quantités sur lesquelles on puisse agir, par le codage par exemple, sans toucher aux constituants réels du canal. Cette quantité est en général délicate à calculer, et seules sont souvent possibles des méthodes numériques de recherche opérationnelle.

## *Théorème fondamental de Shannon*

A partir d'un message reçu en Y, il faut remonter au message émis X avec le moins d'erreur possible. Il est donc nécessaire de se définir une règle de décision à laquelle va être associée une valeur de la probabilité d'erreur. Une idée très simple vient à l'esprit pour minimiser la probabilité d'erreur : répéter les messages à l'émission et décoder suivant, par exemple, la règle du message le plus présent dans tous ceux reçus. Ainsi, on peut penser arriver à une probabilité d'erreur aussi faible que l'on veut en codant avec une redondance de plus en plus grande ; mais le taux de transmission tendrait vers zéro. Le **théorème de Shannon,** sous certaines conditions, infirme ce résultat. Tout ensemble de communication dépend de ce paramètre important : la probabilité d'erreur à la réception.

Calculons-la sur un exemple : un canal B. S. C. (voir *fig.* 3) dans lequel deux messages peuvent être envoyés : $m_1$ 000 $\quad m_2$ 111. Par suite d'erreurs de transmission, huit messages peuvent être reçus : 000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111. On distingue sur cet exemple l'ensemble $X = m_1, m_2$ de départ et l'ensemble Y d'arrivée composé de huit messages. Adoptons la règle de décision suivante : on décode suivant une logique majoritaire, c'est-à-dire que si on reçoit 000, 001, 010, 100, on considère que 000 a été émis, et que, si on reçoit 011, 101, 110, 111, on considère que 111 a été émis. On peut évidemment commettre des erreurs si le message émis a été modifié de plus d'un caractère. Ainsi, calculons certaines probabilités : $P(011/000) = (1 - p)\,p^2$, $P(111/000) = p^3$. Donc la probabilité $P_{e1}$ de commettre une erreur en détectant le message 2 alors que le message 1 a été émis est égale à

$$P_{e1} = 3\,p^2(1 - p) + p^3$$

La probabilité symétrique a la même valeur. Si $a$ est la probabilité de $m_1$ et $(1 - a)$ celle de $m_2$, la probabilité d'erreur vaut :

$$P_e = 3\,ap^2(1 - p) + ap^3 + (1 - a)\,[3\,p^2(1 - p) + p^3]$$

Les équations de cet exemple sont simples. Toutefois, si l'alphabet d'entrée comprend L caractères et qu'on code avec des mots de longueur N, il y a $L^N$ termes possibles. Les calculs deviennent alors pénibles (il est par exemple fréquent d'avoir $N = 50$). Aussi ne calcule-t-on généralement pas cette probabilité d'erreur mais un majorant.

L'objet de toute la théorie du codage est de trouver un code qui permette de minimiser cette probabilité.

Citons alors le **deuxième théorème de Shannon :** soit un canal discret de capacité C et une source d'entropie H bits/caractère. Si H est inférieur ou égal à C, on peut trouver un codage pour la source de manière que la probabilité d'erreur à la réception soit aussi faible qu'on le désire. Ce n'est pas possible si la capacité C est supérieure à l'entropie H (tout codage laisse une probabilité d'erreur finie).

Ce théorème est un théorème limite. Il revient à créer des codes dont la longueur N des mots est très grande et dont la taille M croît avec cette longueur. On peut montrer que $M = 2^{NR}$ dans le cas binaire (R : taux de transmission). Remarquons aussi que, si un codage efficace existe, aucune règle pratique ne le donne.

Comme la lutte contre le bruit reste prioritaire, on utilise d'abord des moyens technologiques : augmentation de la

puissance des signaux émis, apport technologique nouveau (amplification paramétrique, etc.), modulation et démodulation de signaux.

Le codage proposé par le théorème fondamental diminue peut-être le coût des organes de transmission et de réception (quoiqu'il faille tenir compte du système de codage-décodage) mais a l'inconvénient d'entraîner un retard à la réception.

Dans un chapitre ultérieur, nous évoquerons les techniques de codage permettant de lutter contre le bruit : les *codes détecteurs et correcteurs d'erreur.*

## Canal continu

Nous allons maintenant essayer de définir les notions précédentes dans le cas où les signaux à transmettre sont des fonctions continues du temps (musique, parole, image...). Précédemment, à une suite de messages $m_1 \ldots m_n$ on avait fait correspondre un ensemble de probabilités $p\,(m_1) \ldots p\,(m_n)$ et une entropie H

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p\,(m_i)\,\log_2 p\,(m_i)$$

On avait donc une variable aléatoire (la source) X pouvant prendre un ensemble fini de valeurs $m_1 \ldots m_n$ avec certaines probabilités.

On envisage maintenant une source au nombre de messages suffisamment considérable (amplitude du signal musical à transmettre par exemple) pour la considérer comme une source continue. On parle alors de variable aléatoire continue caractérisée, sous certaines conditions mathématiques, par une fonction densité de probabilité $f\,(u)$ [*fig.* 6].

$$f\,(u)\,du = \text{Prob}\,(u < X < u + du)$$

Partant de la définition prise dans le cas discret, on en vient à exprimer l'entropie dans le cas continu par :

$$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} f\,(u)\,\log_2 f\,(u)\,du$$

Cependant, cette nouvelle fonction présente l'inconvénient d'être négative pour certaines densités de probabilité. L'entropie n'a plus dans ce cas la signification concrète qu'on lui avait trouvée dans le cas discret. Elle peut aussi être infinie, l'intégrale divergeant au sens mathématique du terme.

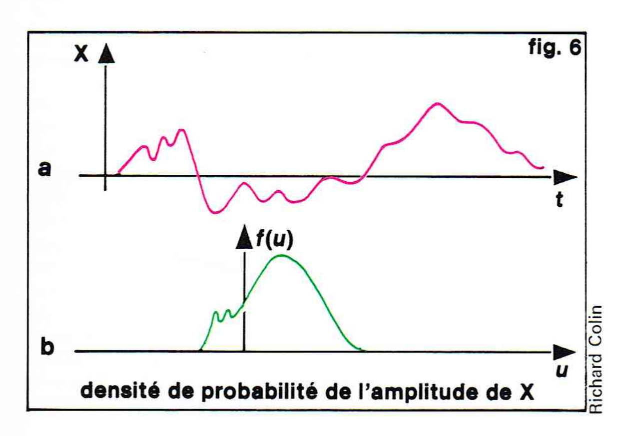
Une autre difficulté est la suivante : dans le cas discret, la valeur de l'entropie associée à un ensemble de probabilités était unique, ce qui n'est pas vrai dans le cas continu. Prenons un exemple simple. Soit un signal dont la distribution d'amplitude est donnée : l'amplitude est comprise entre 1 et 3 avec une probabilité uniforme de 0,5 (*fig.* 7).

Le calcul simple de l'entropie correspondante donne :

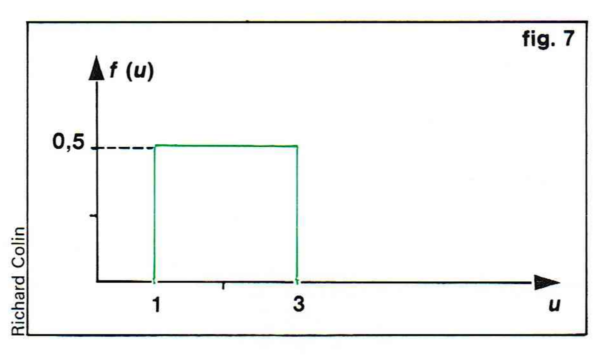
$$H = -\frac{1}{2}\log_2\frac{1}{2} = 1 \text{ bit.}$$

Si le signal est amplifié deux fois (compris entre 2 et 6) [*fig.* 8], l'entropie s'écrit : $H = -\frac{1}{2}\log_2\frac{1}{4} = 2$ bits.

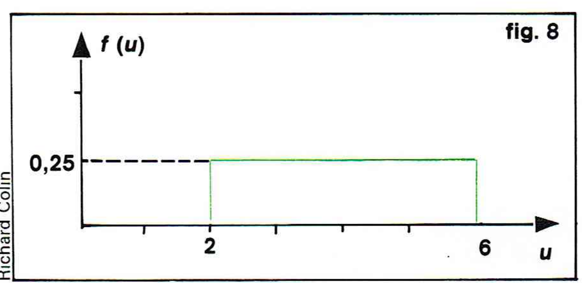
Or l'amplification du signal n'apporte aucune augmentation de l'information. L'entropie dépend donc du système de coordonnées.



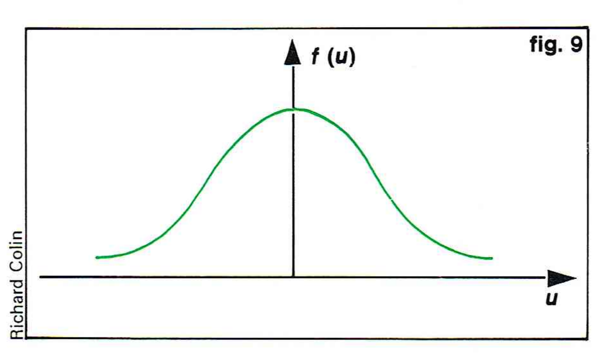

◄ *Figure 6 : transmission de signal dans le cas d'un canal continu ;*
a) *amplitude de la variable aléatoire continue X ;*
b) *densité de probabilité de l'amplitude de X.*




◄ *Figure 7 : exemple d'un signal d'amplitude comprise entre 1 et 3 avec une probabilité uniforme de 0,5.*




◄ *Figure 8 : exemple d'un signal d'amplitude 2 et 6 avec une probabilité uniforme de 0,25.*




◄ *Figure 9 : exemple d'un signal suivant la loi de Gauss (moyenne 0 et variance $\sigma^2$).*

Un cas très intéressant pour la suite du développement est celui où X suit une loi de Gauss de moyenne 0 et de variance $\sigma^2$ (distribution donnée *fig.* 9) :

$$H\,(X) = \log\sqrt{2\,e\pi\sigma}$$

$$\text{où } e = 2{,}718$$

Cette entropie est très utilisée, car on a le résultat suivant : l'entropie de toute variable continue de moyenne nulle et de variance finie est majorée par celle d'une variable de Gauss de même variance. L'entropie est donc maximale lorsque la variable est gaussienne.

De même que dans le cas discret, en utilisant les densités de probabilités conjointes ou conditionnelles, on peut définir :

— l'entropie conjointe de deux variables X et Y

$$H\,(X, Y) = \iint -f\,(x, y)\,\log_2 f\,(x, y)\,dx\,dy$$

— l'entropie conditionnelle

$$H\,(X/Y) = -\iint f\,(x, y)\,\log_2 f\,(x/y)\,dx\,dy$$

et $$H\,(Y/X) = -\iint f\,(x, y)\,\log_2 f\,(y/x)\,dx\,dy$$

On a toujours la relation

$$H\,(X, Y) = H\,(X) + H\,(Y/X) = H\,(Y) + H\,(X/Y)$$

Poursuivant l'analogie formelle avec le cas discret fini, on définit l'information mutuelle entre deux variables X et Y, I (X; Y) par :

$$I\,(X; Y) = H\,(Y) - H\,(Y/X) = H\,(X) - H\,(X/Y)$$

Ces équations régissent la transmission des messages continus. Si l'entropie n'a pas toujours de signification physique, ce n'est pas le cas de I (X; Y) qui n'est jamais négative : on peut bien parler d'information transmise. Dans le cas de 2 variables gaussiennes caractérisées par un coefficient de corrélation $p$, l'information mutuelle vaut :

$$I\,(X; Y) = \frac{1}{2}\log_2\frac{1}{1 - p^2}$$

Les notions des canaux discrets peuvent être étendues aux canaux continus ; on désigne sous ce vocable des canaux susceptibles de transmettre des signaux $x(t)$ continus. La capacité C d'un canal continu est encore définie comme le maximum d'information transmissible, celle-ci étant considérée comme fonction de la densité de probabilité $f(x)$ de l'entrée.

$$C = \max I(X; Y)$$

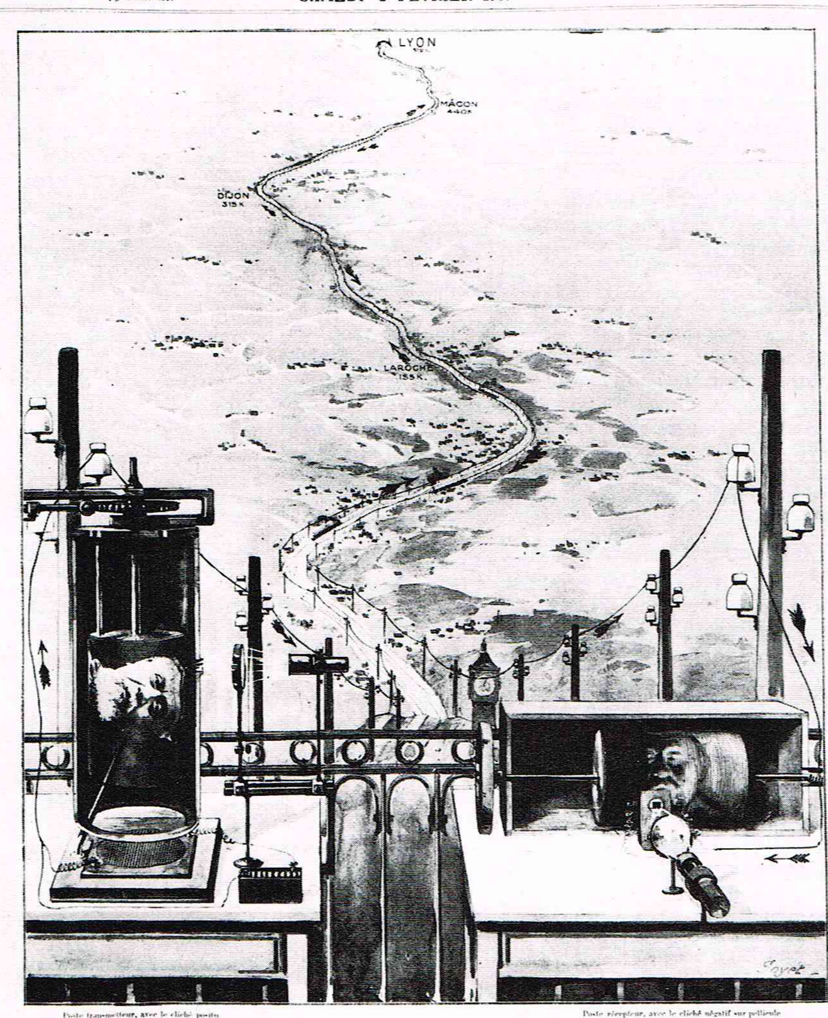
Cette définition n'est en fait valable que pour des signaux limités en fréquence, c'est-à-dire dont la plage de fréquences couvertes est finie.

Ces notions, esquissées dans cette partie, seront reprises lorsque seront traités les problèmes de codage et de communication.

## BIBLIOGRAPHIE

ATLAN H., *l'Organisation biologique et la Théorie de l'information*, Hermann, 1972. - BRILLOUIN L., *la Science et la Théorie de l'information*, Masson, 1959. - CAROWELL D. S. L., *Technology, Science and History*, Heinemann, London, 1972. - ROSE A. M., *Information and Communication Theory*, Blackie and Sons Limited, 1966. - ROUSSEAU R., *Histoire des techniques et inventions*, Hachette, 1967. - SHANNON C. E., *A Mathematical Theory of Communication*, Bell Syst. Tech. vol. 27, pp. 379-423, juillet 1948.

▼ ***Un exemple de transmission dans le cadre d'un canal continu : la transmission téléphotographique d'un portrait de M. Fallières sur le circuit Paris-Lyon-Paris, le 1er février 1907 (journal* l'illustration *du 2 février 1907).***



L'ILLUSTRATION

Prix du Numéro : 75 Centimes. — SAMEDI 2 FÉVRIER 1907 — 65e Année. — N° 3336



Poste transmetteur, avec le cliché positif sur pellicule en cours de transmission.

Poste récepteur, avec le cliché négatif sur pellicule en cours de réception. (Le cliché est supposé développé.)

L'EXPÉRIENCE DE « L'ILLUSTRATION » (1er février 1907).

Transmission téléphotographique d'un portrait de M. Fallières, président de la République, sur le circuit Paris-Lyon-Paris (1.024 kilomètres).

Archives Snark

# LA SAISIE DES DONNÉES

## Problème général

### Métrologie et mesure

La métrologie est une science qui est à la rencontre de toutes les autres sciences. Elle en utilise toutes les ressources en s'appuyant essentiellement sur l'expérimentation. Elle permet au scientifique de déterminer théoriquement les meilleures conditions expérimentales qui lui permettront d'approcher au plus près la vraie valeur d'une grandeur et aussi de connaître l'écart maximal séparant le résultat de sa mesure de la valeur vraie de la grandeur qu'il voulait appréhender.

Il est nécessaire de souligner l'importance qu'a la métrologie dans l'avancement des sciences. C'est elle, bien avant qu'on l'eût baptisée, qui a permis de passer de l'ère du dénombrement puis de l'observation à l'ère de la mesure.

Les premiers hommes ont tenté d'avoir une connaissance du monde qui les entourait en essayant des dénombrements avec des points de repère. Il en a été ainsi pour le temps : les levers et couchers de Soleil rythment les jours, les évolutions de la Lune fournissant un repère grâce auquel il est possible de compter les premiers. Puis l'observation conduit à une perception qualitative permettant des descriptions. Enfin, pour avoir une prise sur le réel, pour prévoir, il a fallu affiner cette observation et introduire la *mesure*. Seuls les phénomènes bien définis et quantifiables peuvent être appelés *grandeurs ;* ils sont susceptibles d'être repérés par un nombre sur une échelle caractérisant chaque *grandeur*, et ce nombre est la *valeur*. Quand on a su définir la somme de deux valeurs d'une même grandeur, on a alors eu accès à la *mesure* au vrai sens du terme.

Le langage courant confond sous le nom de *mesure* deux choses bien différentes : d'abord l'action de mesurer que l'on pourrait désigner d'un néologisme, le *mesurage*, ensuite le résultat de cette action de mesurage qui est, en fait, la valeur de la grandeur considérée.

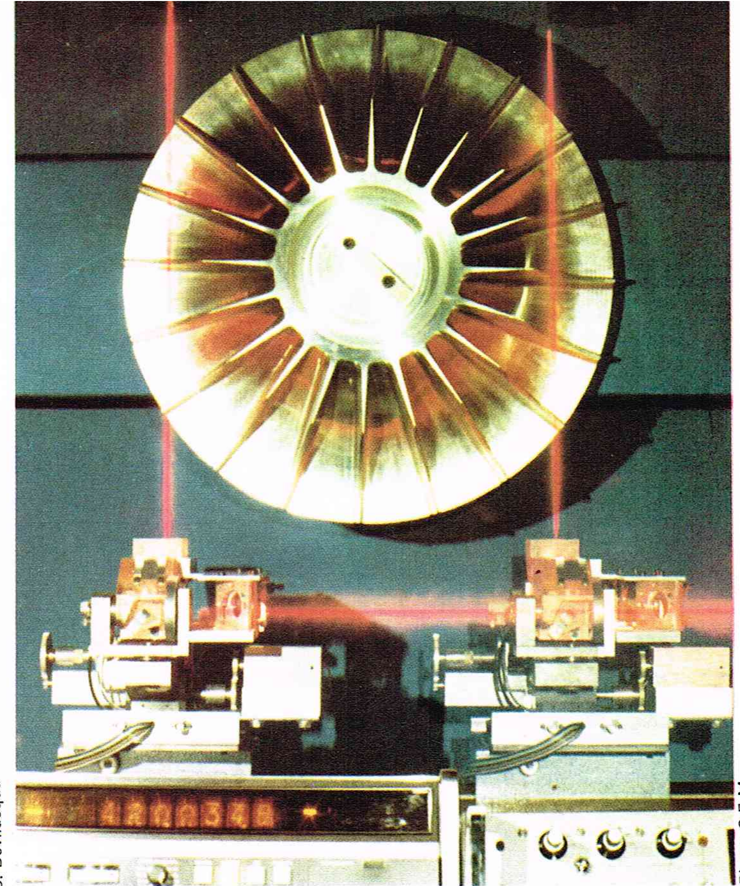
Pour donner une définition assez générale de l'opération de mesure, nous reprendrons l'énoncé de MM. Barrière et Gaignelet (*Métrologie générale*, Dunod) : « C'est l'ensemble des opérations qui consistent à solliciter, obtenir, transmettre et recueillir une information qui exprime l'état d'une grandeur, information qui sera ultérieurement dépouillée, codée ou décodée pour être finalement soit mise en mémoire où elle reste à la disposition de l'expérimentateur qui la confronte avec ses hypothèses, soit injectée dans une machine qui réalise une opération physique. »

### Évolution de la métrologie et de l'instrumentation

Quand les physiciens, après avoir inventé quelques instruments de mesure, ont commencé à disposer de résultats, ils ont cherché à les rendre de plus en plus précis ; cela a contribué pour une grande part à l'avancement des sciences. Ils en sont arrivés à des appareils extrêmement sophistiqués et d'un emploi délicat et minutieux qui ne peuvent plus être utilisés que dans un laboratoire.

L'évolution de la technologie, par ailleurs, a conduit à des contrôles plus soignés des procédés de fabrication industriels. Il a donc fallu adapter au milieu industriel, pour lequel les besoins en précision ne sont pas, en général, trop difficiles à satisfaire, une instrumentation particulière mais qui, en revanche, doit être insensible à des conditions de fonctionnement souvent dures et doit faire apparaître le résultat de la mesure sous une forme exploitable par des utilisateurs non spécialisés ou par des automatismes plus ou moins compliqués. On a donc été amené industriellement à mesurer les grandeurs physiques non pas tant pour en avoir une valeur exacte ou très précise qu'une information utilisable directement dans des dispositifs automatiques. C'est pourquoi la plupart des résultats de mesure sont donnés maintenant sous la forme d'un courant ou d'une tension électrique, qu'une grande gamme d'appareils électroniques sont capables de traiter, de mémoriser pour en tirer les renseignements nécessaires à l'élaboration des ordres de commande des automatismes industriels.


C. Bevilacqua


Photo C.E.M.

▲ *A gauche, le kilogramme-masse-étalon exposé au Bureau international des poids et mesures (pavillon de Breteuil, Sèvres, France). A droite, la mesure du diamètre extérieur d'une roue de compresseur effectuée à l'aide d'un faisceau laser et d'un pentaprisme.*

On a donc développé des instruments capables d'appréhender des grandeurs très différentes et, pour pouvoir appliquer tous les procédés de traitement électronique aux résultats des mesures, ceux-ci sont représentés par un signal électrique. Ces instruments sont habituellement désignés sous le nom de *capteurs*. Ils permettent de transformer une grande quantité de grandeurs physiques en une autre grandeur physique plus particulièrement adaptée au traitement : un signal électrique. Les capteurs constituent ainsi l'entrée de chaînes d'asservissement ou les organes sensibles des automatismes pilotés par des calculateurs.

Il est possible d'avoir une idée des transformations que peut opérer un capteur en consultant le *tableau* I. Dans ce tableau sont présentées verticalement diverses grandeurs à mesurer et horizontalement les grandeurs électriques dans lesquelles on peut les transformer. Au croisement des lignes et colonnes figurent les dispositifs utilisables pour effectuer la transformation.

Sachant de plus que toutes les variations de grandeurs électriques peuvent se ramener à des variations de tension, on imagine la multitude de moyens à notre disposition pour convertir la valeur ou les variations de valeur d'une grandeur en un signal électrique.

Remarquons qu'il est possible d'employer plusieurs types de capteurs pour appréhender une grandeur physique déterminée. Ainsi, pour mesurer la longueur d'une barre métallique, on peut faire rouler sur elle un galet dont on relèvera le nombre de tours, ou faire défiler la barre à vitesse constante devant une cellule qui détectera le début et la fin de son passage, donc le temps pendant lequel la cellule a été occultée.

C'est le côté pratique de la mise en œuvre, avec les performances souhaitées pour la mesure, qui détermine le choix du capteur. Inversement, un transducteur déterminé pourra être utilisé seul ou en conjonction avec d'autres pour faire des mesures très différentes. Ainsi, avec un capteur angulaire, on pourra naturellement faire des mesures d'angles mais aussi de longueurs, de vitesse, d'accélération, de position, de niveau et de contrainte.

Beaucoup de grandeurs physiques sont susceptibles d'être converties en une grandeur électrique dont on sait bien mesurer la valeur. Ces conversions sont faites par le capteur qui utilise les propriétés particulières d'interaction de certains matériaux que l'on nomme couramment les « effets ». Ainsi, l'effet thermo-électrique permettra la conversion de différences de températures en différences de potentiels ou en courant, l'effet piézo-électrique la conversion de forces ou de pressions en charges électriques ; l'effet photo-électrique permettra de transformer un éclairement en un courant, etc.

Ces conversions directes peuvent être quelquefois associées dans un capteur à une transformation plus ou moins mécanique entre grandeurs. C'est ainsi que, dans certains cas, on mesure une force par la déformation qu'elle cause à un anneau métallique ; et c'est la déformation que l'on traduit grâce à une jauge de contrainte en un signal électrique. L'élément primaire, l'anneau dynamométrique, forme alors le corps d'épreuve.

## Les capteurs

### Chaîne de mesure

Examinons la manière dont peut s'ordonner une *chaîne de mesure* (*fig.* 1).

Au sein d'un système physico-chimique quelconque, stable ou en cours d'évolution, il y a la grandeur que l'on se propose de saisir. Elle n'est pas toujours directement accessible, et ce que l'on mesurera effectivement sera une grandeur physique ou chimique à laquelle la première est liée.

Le capteur intervient pour mesurer la seconde grandeur et fournir un signal qui la représente. Ce signal n'est qu'une grandeur objet codant la grandeur mesurée, et n'est mis en œuvre que pour ses caractéristiques fondamentales de facilité de représentation, de transmission ou de traitement. C'est bien la raison pour laquelle ce signal est, dans la majorité des cas, une grandeur électrique, tension ou courant. Le signal de mesure subit alors une première série de transformations destinées à faciliter sa transmission (amplification, modulation, etc.).

Après avoir été transmis, le signal sera éventuellement démodulé ou détecté, décodé, avant d'être traité de manière à en extraire la valeur de la grandeur à saisir ou pour élaborer un signal de commande permettant de modifier les conditions d'évolution du système physico-chimique de départ.

Le *capteur* réalise habituellement l'ensemble des opérations de conversion de grandeurs, de saisie et de conditionnement du signal, soit pour la transmission, soit pour le traitement, en donnant au signal une énergie suffisante pour l'affranchir de l'influence ultérieure de parasites. Sur le schéma de la chaîne de mesure apparaît un *transmetteur* qui est un dispositif quelquefois adjoint au capteur et qui est plus particulièrement chargé du conditionnement du signal pour sa transmission, le capteur continuant d'effectuer la saisie de la grandeur mesurée.

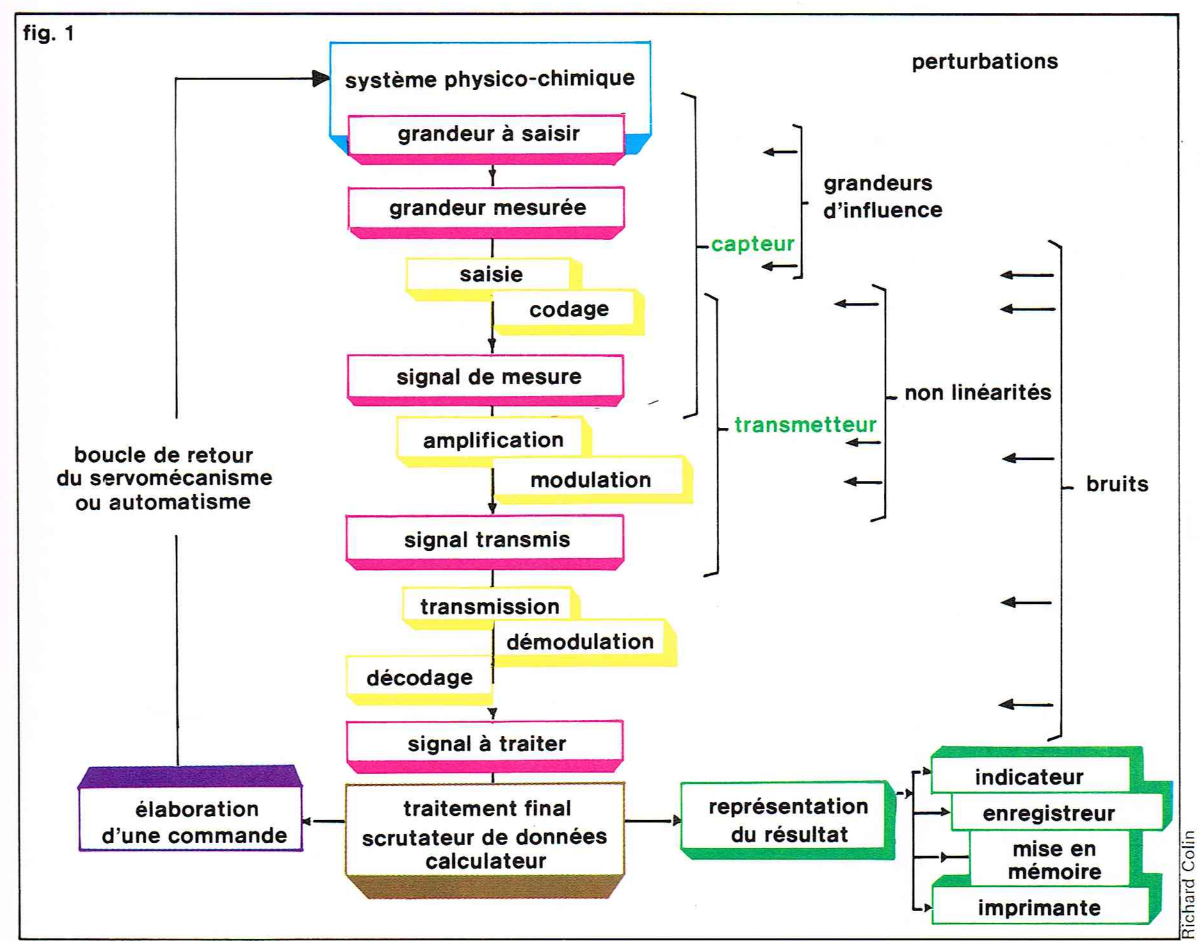
Donnons un exemple qui serait de vouloir connaître la température d'un métal en fusion dans un four. On procédera par méthode pyrométrique et ainsi on essaiera d'atteindre la température du métal (grandeur à saisir) en mesurant l'émissivité de la surface du métal fondu assimilé

## Tableau I

### Transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques

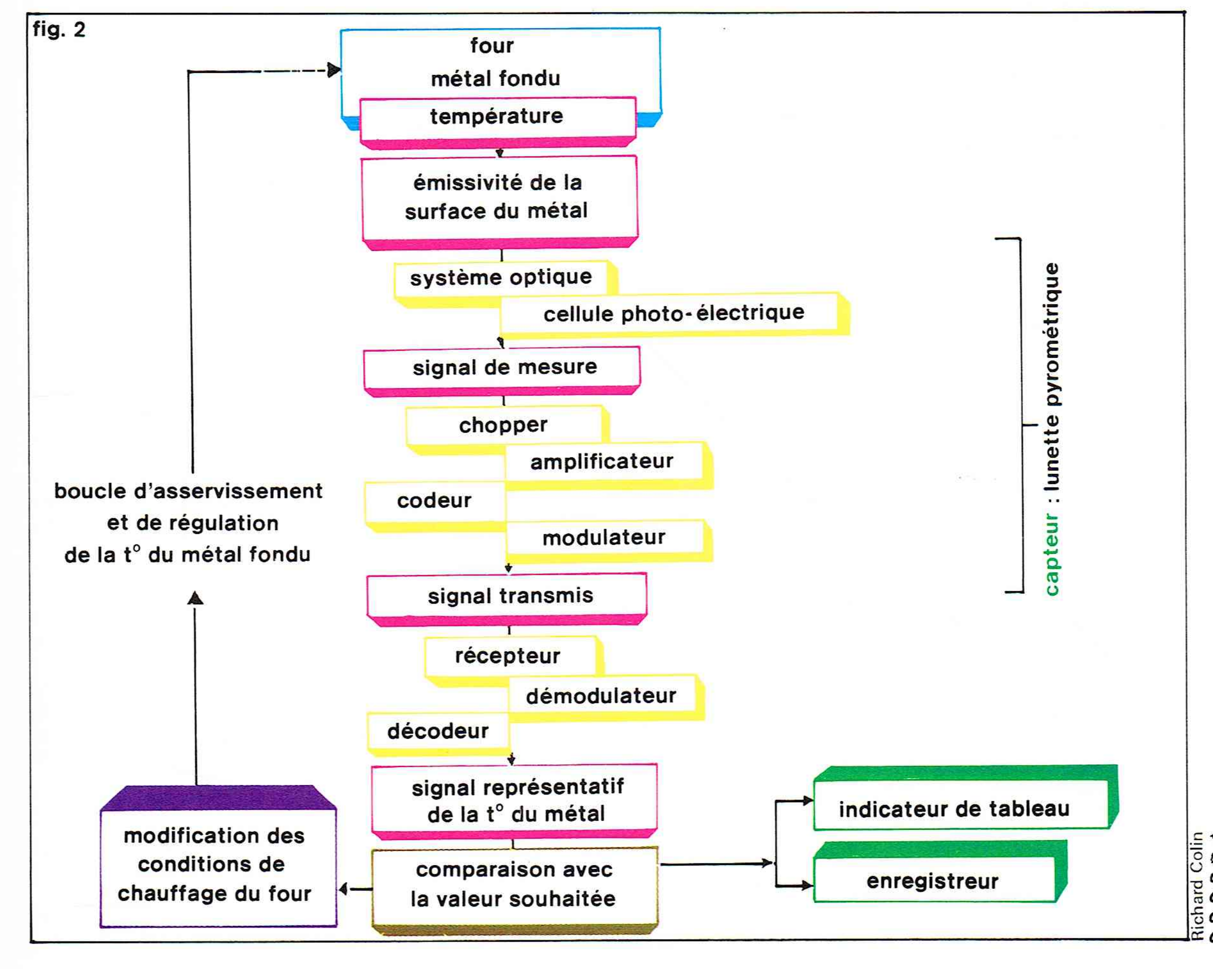
| Principe de fonctionnement / Grandeur mesurée | Variation de résistance $dR$ | Variation de capacité $dC$ | Variation d'un coefficient d'induction $dL$ ou $dM$ | Variation de flux $d\Phi/dt$ ou $d\Phi/dx$ | Variation de fréquence $dN$ | Variation de charge $dQ$ | Variation de flux électronique ou ionique | Variation de potentiel $dE$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Longueur (épaisseur) | Mesure de la conductibilité | Mesure d'épaisseur de diélectriques par variation de capacité | | Transparence aux rayons X, $\gamma$ et $\beta$ | Résonance mécanique | | | |
| Temps | | | | | | Mesure d'une quantité d'électricité | | Charge d'un condensateur à courant constant |
| Force (microdéplacement) $F = (1/K)\ dl$ | Fil résistant nu, semi-conducteur (pile de carbone, caoutchouc, semi-conducteur, micro à grenaille) | Voir aussi Pression | Variation de réluctance d'un circuit magnétique déformable | Variation du flux lumineux par la biréfringence du verre. Magnétostriction Voir aussi Pression | | Cristaux piézo-électriques | | |
| Déplacement $dl$ | Potentiomètres Fil tendu Fil de bismuth Semi-conducteurs (par effet Hall) | Électrodes fixes et mobile liées à l'objet | Variation de réluctance. Pertes H.F. dans une plaque mobile | Variation d'un flux lumineux par effet d'écran | Fil vibrant tendu (cordes vibrantes) | Cristaux piézo-électriques (bilames en particulier) | Tube électronique à électrodes mobiles | Variation de potentiel d'un condensateur chargé en fonction du déplacement des électrodes |
| Allongement relatif $dl/l$ | Jauges résistantes à fil et à semi-conducteurs | Électrodes scellées en 2 points | Variation de perméabilité d'un circuit magnétique | | Fil vibrant tendu (cordes vibrantes) | | | |
| Position ($dl$ ou $dx$) | Potentiomètres Résistances déformables | Condensateur variable | Variation de réluctance de transformateurs rotatifs | | | | Tubes à électrodes mobiles | |
| Pression (microdéplacement) $P = (S/K)\ dl$ | Contacts oxydes-métaux Voir aussi Force | Déformation d'une électrode (intermédiaire mécanique) | | Membrane agissant sur une bobine mobile (intermédiaire mécanique). Voir aussi Force | | Voir aussi Force. Cristaux piézo-électriques sensibles à la pression hydrostatique | Jauge à ionisation | |
| Vitesse linéaire (solide, fluide) $dx/dt$ | Fil chaud | | | Moulinet à aimant permanent ou à réflexion d'un flux lumineux | Effet Doppler-Fizeau pour les grandes vitesses | | Tube accéléromètre à électrodes mobiles | |
| Vitesse angulaire $d\alpha/dt$ | | | | Variation de flux lumineux (intermédiaire mécanique). Dynamos, moteurs biphasés | Roue phonique | Charge et décharge d'un condensateur (intermédiaire mécanique) | | |
| Rayonnement Opacité Transparence | Bolomètre | | | Cellules photo-électriques à vide et gaz : photopiles, cellules photorésistantes. Transparence aux rayons $\beta$ et $\gamma$ | | Semi-conducteurs (titanate de baryum) | Chambres d'ionisation Tubes Geiger-Müller | Pile thermo-électrique |
| Température | Sonde à fil de platine Semi-conducteurs Bolomètre | | | Photopiles Cellules photorésistantes | Quartz oscillant | | | Thermocouples |
| Conductibilité | Mesure directe par électrodes de platine | | | | | | | |
| Humidité | Variation de résistance de ClLi Mesure directe de la résistance d'une surface ou d'un volume | Condensateur (variation de constante diélectrique) | | | | | | |
| Perméabilité | | | Mesure par variation de $\mu$ | | | | | |
| Potentiel | | Charge et décharge de condensateurs | | | | | | Électrodes spéciales pour pH (électrodes de verre) Électrodes à gouttes de mercure |

◀ *Page ci-contre, tableau I : les différentes transformations possibles d'une grandeur mesurée (non électrique) en grandeur susceptible d'être mesurée par des procédés électriques et électroniques (d'après U. Zelbstein, Mesures électriques, Dunod, Paris, 1969).*



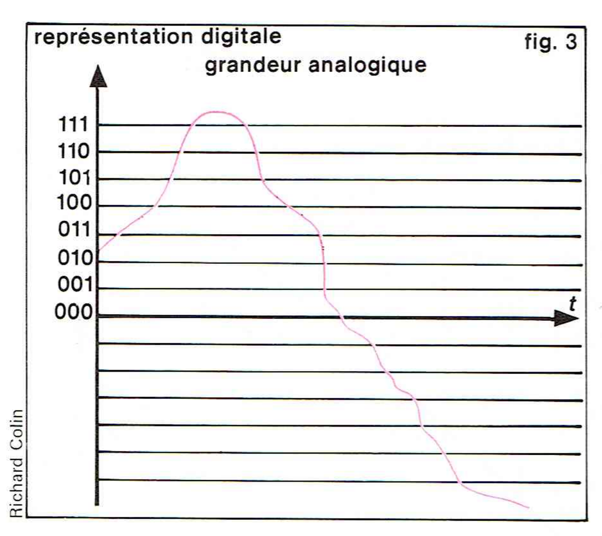


◀ *Figure 1 : représentation schématique d'une chaîne de mesure.*




◀ *Figure 2 ; un exemple de chaîne de mesure : la mesure de la température d'un métal en fusion dans un four.*

▶ *Figure 3 : représentation digitale et analogique pour 4 bits dans le cas du code binaire ; dans ce cas 16 valeurs sont représentables.*




▶ *Page ci-contre, tableau II : codage des différentes positions de l'axe des codeurs à contact ou des codeurs optiques avec un code Gray et avec un code* BCD *(M. C. B.).*

▼ *Un codeur optique angulaire incrémental RI 15 : ce type de codeur fournit directement l'information sous forme digitale (mot digital de 10 ou 12 bits permettant une définition de 1 000 ou 1 024 points/ tour et une résolution de 21,6 ou 21').*

au corps noir par radiométrie optique. Le rayonnement émis par cette source frappe une cellule photo-électrique qui convertit le nombre de photons reçus en une tension électrique continue. Pour amplifier facilement ce signal continu, il est haché à une fréquence déterminée (ce qui est une sorte de codage par un « chopper », terme anglais utilisé par les électroniciens) puis conduit à un modulateur ou à un codeur avant d'être transmis vers la salle de mesures où tous les paramètres du processus sont centralisés. La chaîne de mesure dans ce cas précis est représentée sur la *figure* 2.

## Nature des signaux de mesure

### Signaux analogiques ou continus dans le temps

Ces signaux sont tels que la précision avec laquelle on les connaît dépend de l'appareil et de la méthode de mesure. C'est la forme la plus répandue sous laquelle on appréhende les résultats de mesure.

### Signaux logiques ou digitaux

Suivant le code employé, le nombre de bits utilisés pour la représentation des grandeurs fixe absolument le nombre de valeurs différentes représentables et, par conséquent, la résolution. Ainsi, en utilisant 4 bits, on sera capable de distinguer 16 combinaisons différentes des bits et, par suite, de représenter 16 informations différentes. S'introduit la notion importante de quantification de l'information. Toutes les valeurs possibles de la grandeur à mesurer ne sont pas traduites par le code ; seules 16 d'entre elles, dans l'exemple présent, sont représentables (*fig.*3).

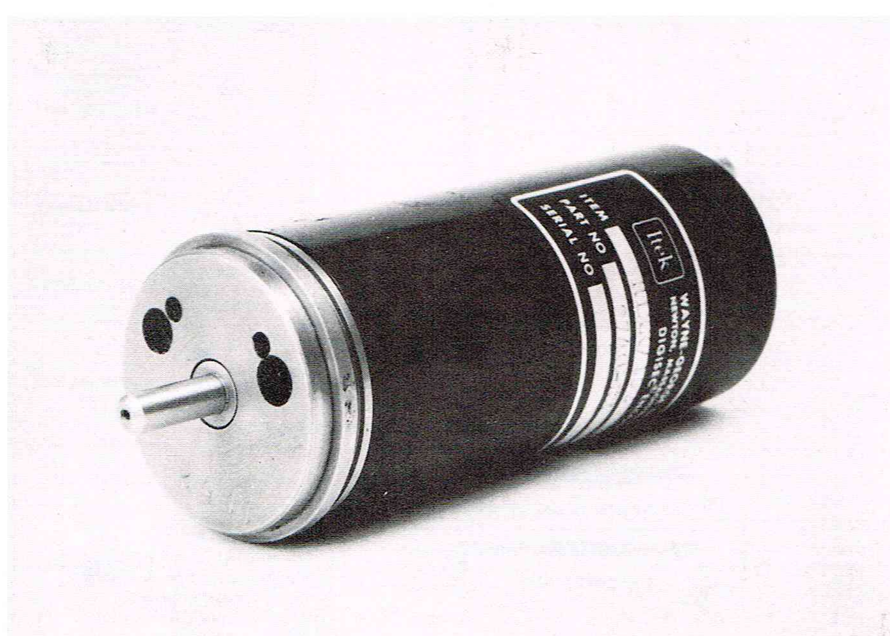



Photo Sedeme

De plus, comme la traduction d'une valeur analogique ou de son équivalent digital demande du temps et qu'il est nécessaire de conserver présente pendant tout ce temps la valeur analogique de la grandeur, on utilise un *échantillonneur-bloqueur*. Ce dispositif prélève un *échantillon* de la valeur à convertir et le *bloque* jusqu'à ce que la conversion soit terminée, puis recommence avec un autre échantillon.

L'apparition des moyens modernes de traitement de l'information (scrutateurs de données, calculateurs...) favorise le développement de cette forme de signal. Un grand nombre de capteurs délivrant une tension de sortie analogique, les signaux doivent être transformés au moyen de convertisseurs analogiques-digitaux. Certains capteurs cependant fournissent directement l'information sous forme digitale ; il en est ainsi, par exemple, de nombreux codeurs de position angulaire qui indiquent la position de leur axe par un mot digital de 10 à 12 bits permettant une résolution de 1 000 ou 1 024 points sur un tour suivant le code utilisé.

Le *tableau* II montre comment sont codées les différentes positions de l'axe avec un code Gray ou avec un code BCD. La caractéristique importante de ces deux codes est que deux positions voisines sont codées avec deux mots digitaux dont un seul bit est modifié ; cela permet d'éviter des indications erronées quand l'axe est arrêté à la limite de chaque position. Parmi tous les codes digitaux qui pourraient être utilisés pour faire ce codage, on choisit précisément un de ces deux-là à cause de cette propriété remarquable.

Ainsi, en code Gray, les positions 9 et 10 sont codées (en n'utilisant que les 5 premiers bits) :

| | |
|---|---|
| 9 | 0 1 1 0 1 |
| 10 | 0 1 1 1 1 |

Si l'axe s'arrête dans une position angulaire limite de 9 ou 10, l'indication du code ne pourra pas être différente de 9 ou 10 puisque seul le bit n° 2 est susceptible de changer.

En milieu industriel, les signaux digitaux (on dit aussi numériques) présentent un grand intérêt : ils sont relativement peu sensibles aux parasites. En effet, le signal n'est plus représenté directement par son amplitude en fonction du temps comme c'est le cas sous sa forme analogique, mais son amplitude, à des instants régulièrement répartis, est représentée par un ensemble de tensions qui ne peuvent prendre que deux niveaux choisis bien séparés pour que les parasites ne puissent pas nous amener à prendre un niveau pour l'autre. Sous cette forme, le signal devient donc peu sensible aux parasites, et l'introduction d'erreurs est plus rare et difficile.

## Parasitage de la chaîne de mesure - Perturbations

De toute la chaîne de mesure, et pas seulement du capteur, dépendra la précision de la mesure et la justesse du résultat qu'au bout du compte on prendra comme valeur de la grandeur à saisir. Il est donc utile de considérer l'origine des perturbations que le signal va subir au cours de la mesure, et les moyens que l'on peut mettre en œuvre pour se prémunir de leurs effets.

Les perturbations sont très diverses. On peut les classer en trois catégories : grandeurs d'influence ; non-linéarités ; bruits. Elles interviennent à différents niveaux de la chaîne de mesure et constituent des sources d'erreurs.

### Erreurs systématiques et erreurs aléatoires

Les erreurs systématiques sont théoriquement corrigibles puisque l'on sait de quelle manière et à quel niveau de la chaîne de mesure elles interviennent.

Les erreurs aléatoires sont difficilement corrigibles, car on ne peut pas prévoir où, quand et comment elles interviennent. Les seuls procédés utilisables pour les corriger sont de nature statistique, en procédant par moyennes par exemple.

### Sources d'erreurs

Elles sont multiples et se situent dans les instruments, dans le procédé physique et dans le déroulement de la mesure.

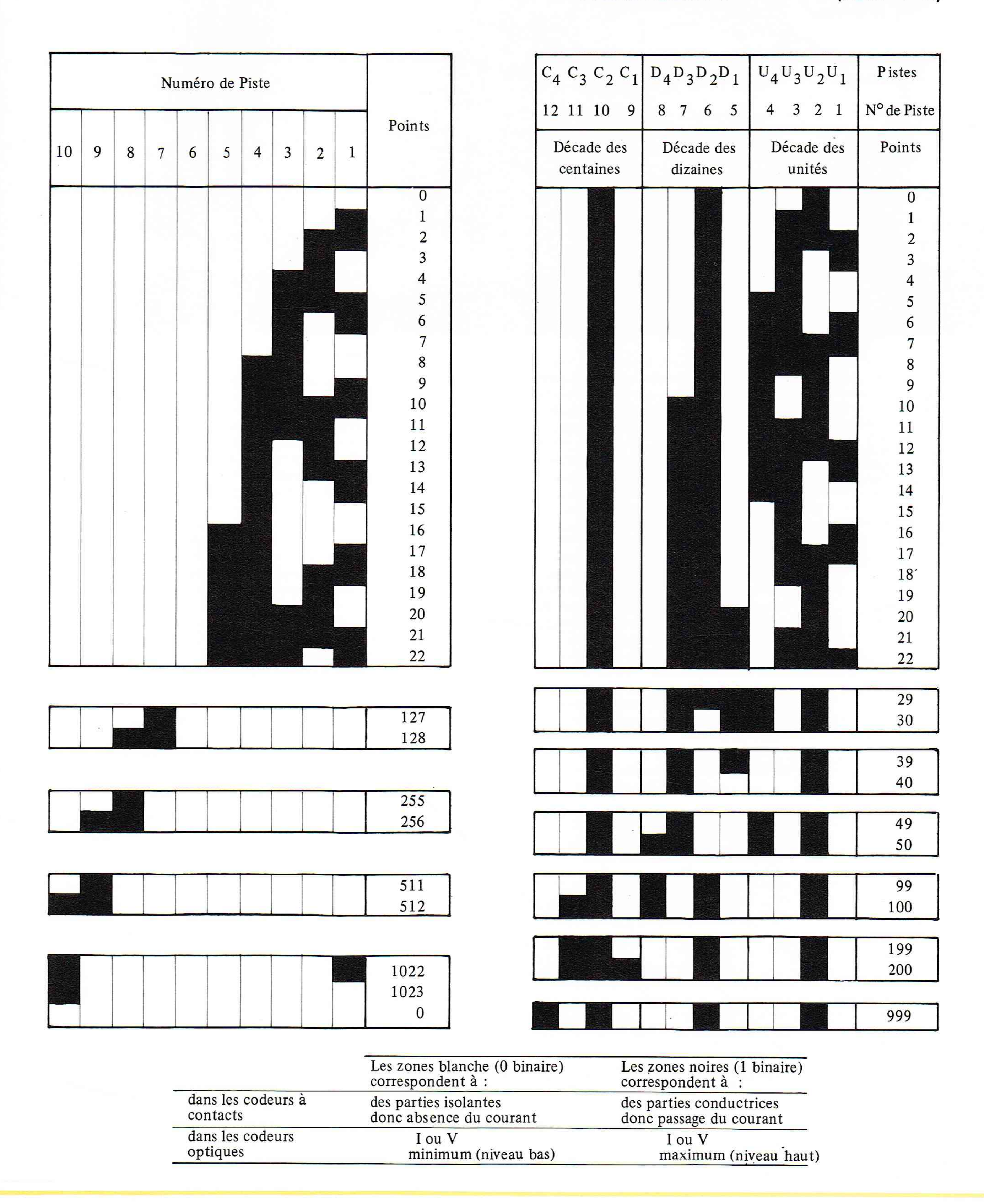
Ainsi, une source d'erreur instrumentale fondamentale concerne la réaction de l'instrument sur la grandeur à

# codeurs

**Tableau II - (d'après MCB)**

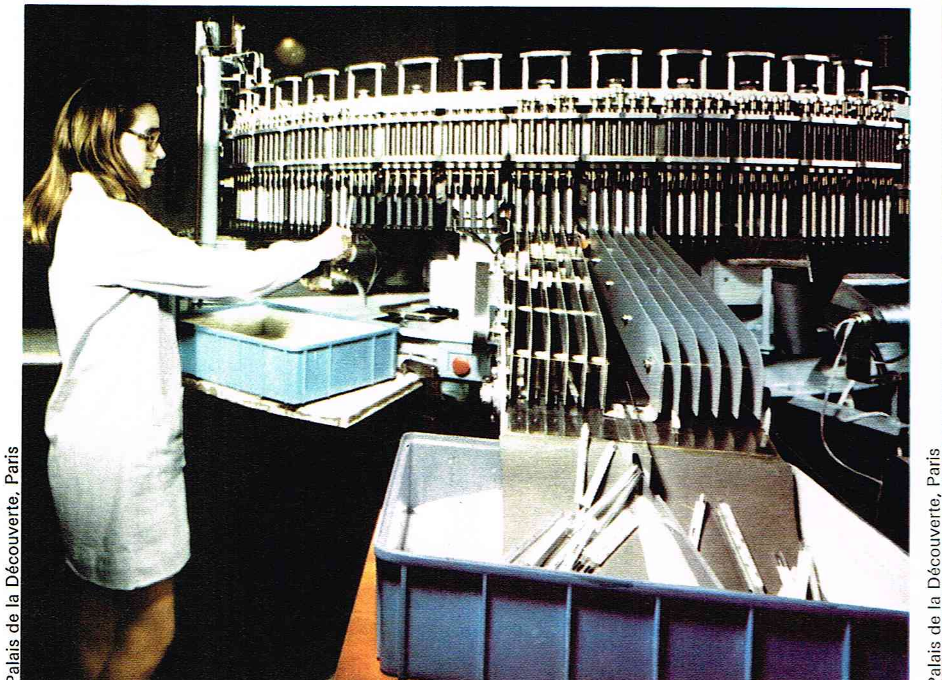
**CODE BINAIRE REFLECHI (CODE GRAY)**

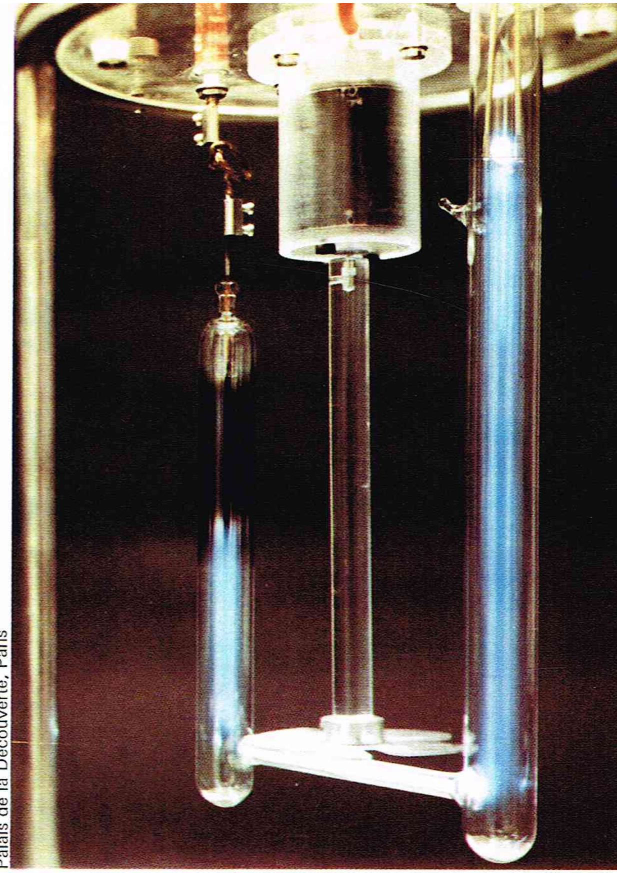
**CODE DECIMAL BINAIRE REFLECHI A EXCEDENT 3 (BDR + 3)**




| | Les zones blanche (0 binaire) correspondent à : | Les zones noires (1 binaire) correspondent à : |
|---|---|---|
| dans les codeurs à contacts | des parties isolantes donc absence du courant | des parties conductrices donc passage du courant |
| dans les codeurs optiques | I ou V minimum (niveau bas) | I ou V maximum (niveau haut) |

M.C.B.


Palais de la Découverte, Paris


Palais de la Découverte, Paris

▲ *A gauche, appareil de contrôle des thermomètres médicaux. A droite, une lampe à krypton mise au point par E. Engelhardt; la longueur d'une onde de cette lampe permet de définir le mètre international.*

mesurer. On sait bien qu'un thermomètre plongé dans un liquide provoque une modification de la température de ce dernier à cause de sa propre capacité calorifique et que cette perturbation est d'autant plus grande que le volume du liquide est petit. Cet exemple grossier doit toujours rester présent à l'esprit de quiconque effectue une mesure. La qualité essentielle de l'instrument de mesure doit être de ne perturber qu'au minimum la grandeur mesurée; en tout cas, il est nécessaire de tenir compte, au besoin par un étalonnage, de cette perturbation pour connaître la précision de la mesure.

Dans certains capteurs élaborés, on utilise un asservissement pour diminuer la perturbation apportée par l'instrument. Par exemple, une mesure de pression se fait souvent par déformation d'une membrane et introduit donc une modification du volume de l'enceinte dans laquelle on veut mesurer la pression. Pour pallier cet inconvénient, on utilise un asservissement qui, créant une contre-pression de l'autre côté de la membrane, rétablit presque complètement le volume initial. Il est à noter d'ailleurs que c'est la contre-pression qui est mesurée et que la membrane primaire n'est utilisée que pour détecter l'équilibre.

### Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence interviennent au niveau du capteur ou dans la relation grandeur à saisir-grandeur mesurée. Ce sont : les conditions thermiques ou météorologiques comme la température, la pression, l'hygrométrie, etc.; les grandeurs électromagnétiques comme le champ magnétique, des tensions électriques parasites, etc.; les actions mécaniques comme une accélération ou un choc, des vibrations, les jeux ou les frottements, etc.

### Non-linéarités

Les non-linéarités sont plus spécifiquement localisées dans les transformations que subit le signal et donc l'information. Elles introduisent des erreurs systématiques.

### Bruits

Les bruits s'introduisent à tous les niveaux de la chaîne de mesure. Ils amènent par principe des erreurs aléatoires dont la correction ne peut guère être que de nature statistique. Le meilleur moyen de minimiser les perturbations dues aux bruits est de se garantir de leur influence en agissant le plus possible sur la cause.

Si l'on peut déterminer les endroits sensibles au bruit, il convient de les protéger le mieux possible contre les bruits extérieurs par des blindages, des systèmes antivibratoires, etc.

## *Caractéristiques fondamentales d'un capteur*

Suivant le transducteur utilisé et le traitement imposé au signal issu de ce dernier, un capteur possède des caractéristiques fondamentales qui déterminent son utilisation. Nous allons les étudier ci-après.

**Sensibilité.** C'est le rapport de la grandeur électrique de sortie au paramètre physique d'entrée. C'est ainsi que nous pouvons chiffrer la sensibilité d'un capteur de déplacement, par exemple, en volts par millimètre.

On peut relier à cette caractéristique l'unidirectionnalité de la sensibilité. Il s'agit de la sensibilité à une autre grandeur physique liée à la première, mais que l'on voudrait isoler. Pour un capteur de vibrations par exemple, il est nécessaire de mesurer les déplacements suivant un axe déterminé. La plupart du temps, le capteur utilisé sera également sensible aux vibrations et aux déplacements transversaux. Cela perturbera la mesure de la grandeur que l'on voudrait isoler. On définit donc une sensibilité parasite en proportion de la sensibilité principale.

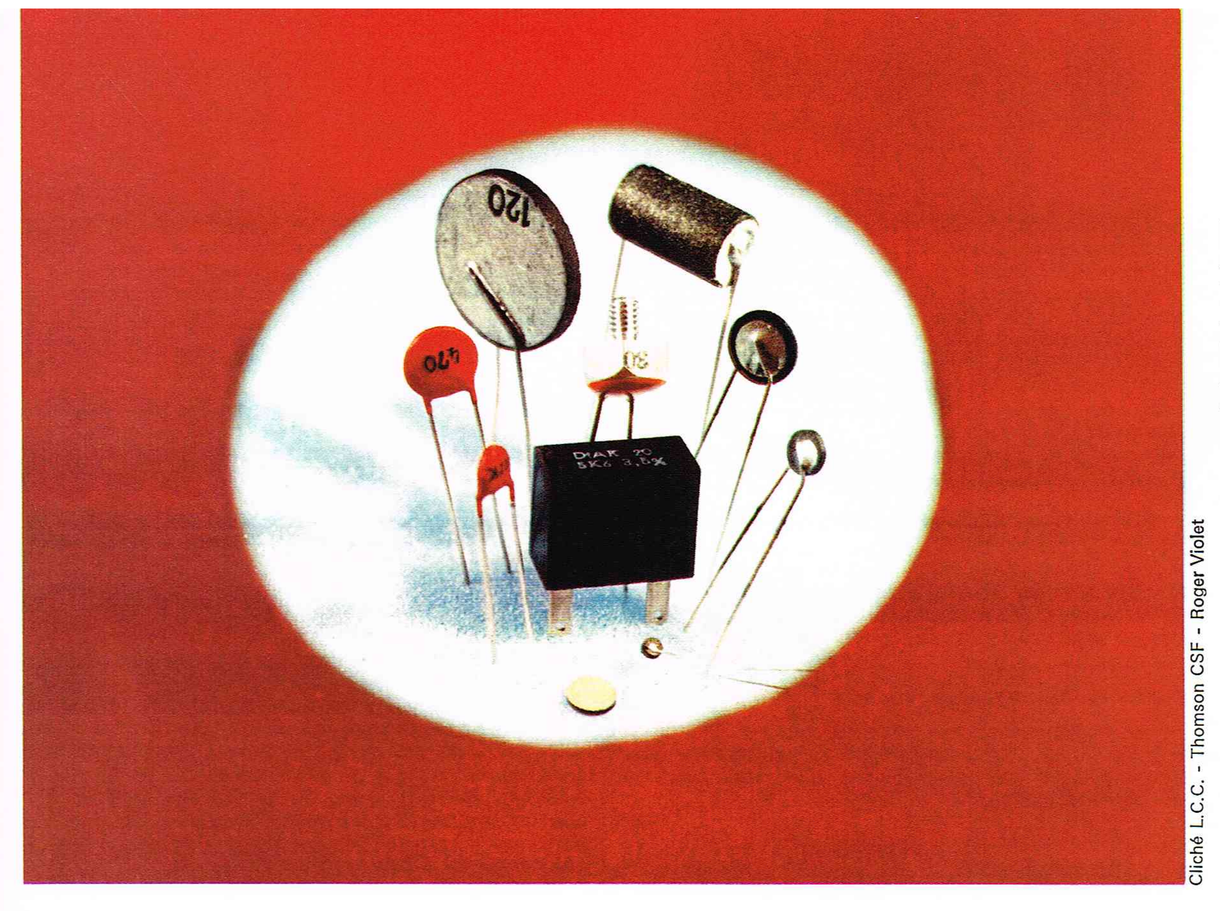
**Résolution.** On la détermine comme la plus petite variation de la charge qui crée une variation du signal de sortie. On l'appelle quelquefois *seuil de sensibilité*.

**Linéarité.** Un capteur est dit *linéaire* lorsque sa sensibilité reste constante, quelle que soit l'amplitude de la sollicitation appliquée. La plupart du temps, cette linéarité n'est obtenue qu'à l'intérieur de certaines limites de variations provenant des caractéristiques intrinsèques du transducteur (frottement, limite élastique...). La linéarité d'un capteur s'exprime en pourcentage de l'échelle totale de sortie et n'est donnée, en général, que pour une charge croissante.

**Dynamique du capteur.** C'est le rapport de la plus grande sollicitation acceptable (par suite de rupture, de non-linéarité inacceptable, de saturation...) à la plus petite sollicitation détectable (par suite du bruit ou de la résolution du capteur).

**Hystérésis.** Quand on trace la courbe de sensibilité du capteur, il est possible que le signal de sortie n'ait pas la même valeur quand la charge a une même valeur, suivant qu'elle augmente ou diminue. On chiffre généralement l'hystérésis par l'écart maximal obtenu entre les signaux de sortie pour une même charge quand la sollicitation augmente à partir de zéro et quand elle diminue à partir de la sollicitation maximale admise par le capteur. L'hystérésis doit être distinguée de la dérive et du fluage.

**Dérive.** Il s'agit de la variation du signal de sortie du capteur liée principalement aux variations de température ou à l'imperfection de la stabilité du système d'adaptation du signal.




Cliché L.C.C. - Thomson CSF - Roger Violet

◀ *Quelques exemplaires de thermistances : la variation rapide de la résistance de ces semi-conducteurs avec la température les fait utiliser comme capteurs de température ; ils sont environ 10 fois plus sensibles que le thermomètre à résistance de platine.*

**Fluage.** C'est la variation du signal de sortie sous charge en fonction du temps. Cette variation est généralement toujours de même sens, elle dépend surtout du transducteur. Cette variation est surtout sensible pour les transducteurs fondés sur une déformation de la matière.

**Gamme de fréquences d'utilisation.** Les performances d'un capteur peuvent être profondément modifiées par la fréquence. Il faut donc spécifier dans quelle gamme de fréquences la sensibilité est donnée et la linéarité garantie.

**Effets des facteurs d'environnement.** Il est évident que de nombreux agents d'environnement peuvent influer sur les caractéristiques d'un capteur. Les plus importants et les plus gênants sont : la température, les parasites ambiants, l'humidité, la poussière ou la fumée.

Si la sonde proprement dite est pratiquement toujours sensible à la température, il est normalement prévu dans le capteur des éléments ou des circuits de compensation tels que les caractéristiques indiquées précédemment peuvent être spécifiées dans une gamme de températures plus ou moins grande. La température à laquelle doit fonctionner un capteur, même s'il n'est pas lui-même un capteur de température, influence beaucoup sa construction. Il est même possible que l'on doive s'adresser à un autre type de transducteur pour travailler dans certaines gammes de températures trop élevées ou trop basses avec une bonne linéarité ou une sensibilité convenable.

Une ambiance fortement parasitée ainsi que l'humidité, les poussières, etc., nécessitent une construction soignée du capteur ; l'élément transducteur et l'électronique d'adaptation sont placés dans des boîtiers formant blindage et résistant aux agents extérieurs perturbateurs ou même corrosifs.

Certaines présentations sont dites « tropicalisées » pour indiquer qu'elles répondent à des conditions très rudes de fonctionnement.

## Les transducteurs

Après avoir posé le problème et décrit les caractéristiques fondamentales d'un capteur, nous allons examiner quelques moyens spécifiques que la physique ou la chimie nous offrent de convertir des grandeurs entre elles. Nous appellerons l'élément faisant cette conversion le *transducteur*, pour le différencier du capteur qui a une définition plus floue suivant sa réalisation. Le capteur utilise généralement un transducteur et comprend les circuits nécessaires à l'alimentation et au bon fonctionnement du transducteur ainsi qu'une bonne part des circuits de mise en forme du signal prélevé.

Comme nous l'avons déjà souligné, il existe généralement plusieurs moyens d'appréhender une grandeur déterminée. Ce sont des considérations de facilité de




Cliché L.C.C. - Thomson CSF - Roger Violet

◀ *La large gamme des thermistances professionnelles ou d'usage général permet le contrôle des températures dans tous les domaines et jusqu'à plus de 200 °C.*

mise en œuvre, de fiabilité, d'exigences particulières liées à l'environnement, de sensibilité et de précision qui conduiront à choisir un capteur plutôt qu'un autre.

Les quelques phénomènes physiques ou chimiques que nous décrirons par la suite amènent à la construction de capteurs ayant des principes de fonctionnement différents, sans que l'on puisse citer toutes les applications où ils pourraient servir. Cette description doit donner quelques idées sur les immenses possibilités qui nous sont offertes de mesurer des grandeurs.

## *Capteurs électriques*

Nous ne ferons que noter les différents capteurs électriques comme les transformateurs de tension ou d'intensité, ainsi que les voltmètres et les ampèremètres. Ce sont des capteurs où il n'y a pas transformation de nature de la grandeur physique. Leur utilisation dépend des mêmes caractéristiques que celles qui viennent d'être énoncées.

### *Capteurs à impédance variable*

Pour transformer une grandeur physique en une grandeur électrique, il est possible d'agir sur un élément passif d'un circuit, comme une résistance, un condensateur ou une self-inductance.

#### Capteurs à résistance variable

Il y en a de trois sortes :

— la grandeur physique à mesurer agit mécaniquement sur le curseur d'un rhéostat ;

— elle agit sur les dimensions géométriques de l'élément résistif en modifiant $l$ ou S de la formule

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

— elle agit sur la résistivité suivant différents processus physiques.

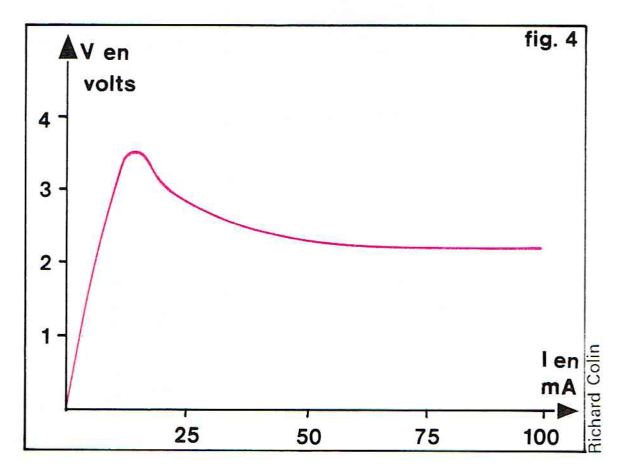
Le premier type est souvent utilisé pour sa grande simplicité de mise en œuvre, et ne nécessite pas un développement théorique particulier. Les deux autres sortes de capteurs à résistance variable sont souvent mélangées, en ce sens que les deux phénomènes agissent conjointement : c'est l'*effet piézorésistant*. La grandeur physique agit directement à la fois sur les trois paramètres de la résistance : $\rho$, $l$ et S. Cet effet a été mis en évidence par lord Kelvin dans les métaux, et on le retrouve dans les jauges classiques à fil ou ruban résistant. Il existe aussi, cinquante fois plus important, dans les semi-conducteurs. Nous n'insisterons pas davantage sur ce point qui sera examiné très en détail dans les jauges de contrainte.

* *Thermistances*

La résistivité des semi-conducteurs diminue rapidement lorsque leur température s'élève suivant la loi

$$\text{Log}\,\frac{R}{R_0} = K\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)$$

La variation de résistance par degré varie suivant les corps choisis de 3 à plus de 5 % par degré. La résistance chute de moitié pour un échauffement de 20°. Les thermistances sont constituées d'oxydes tels que $NiO + MnO_3$, ou de sulfures $Ag_2S$ frittés. Leur variation rapide avec la température les fait utiliser comme thermomètres dix fois plus sensibles que le thermomètre à résistance de platine, mais jusqu'à maintenant moins fidèles.



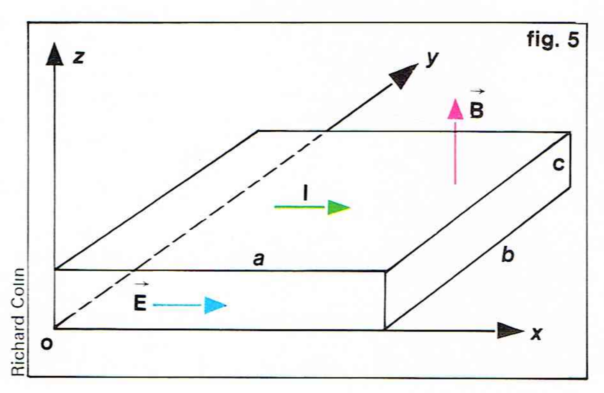

▶ *Figure 4 : caractéristique d'une thermistance.*

Les thermistances suivent la loi d'Ohm si elles sont maintenues à température constante, mais dans les conditions habituelles d'emploi, le courant I qui les traverse peut faire diminuer R par échauffement au point que RI diminue, bien que I augmente. La caractéristique V, I à la température d'équilibre thermique a une partie de résistance négative. Cette partie est représentable par la relation $I = \sigma V^{-2}$ (*fig.* 4).

* *Magnétorésistances*

La magnétorésistance est la variation de résistance de matériaux sous l'action combinée d'un champ électrique E et d'une induction magnétique B. Elle est due à la déviation du courant électrique, ce qui constitue l'effet Hall (1879).

— *Action d'un champ électrique et d'un champ magnétique.* Supposons une plaquette d'un conducteur ou d'un semi-conducteur parcourue par un courant I sous l'action du champ électrique $E_x$ suivant la *figure* 5.




▶ *Figure 5 : représentation schématique de l'action d'un champ électrique $E_x$ et d'un champ magnétique B sur une plaquette de conducteur ou de semi-conducteur utilisée dans un capteur à résistance variable.*

La densité de courant $\delta$ s'exprime en fonction de la conductivité du matériau et de la mobilité des électrons :

$$\vec{\delta} = \sigma\vec{E} + \mu\vec{\delta} \wedge \vec{B}$$

Ce qui donne, en projetant sur O$x$ et O$y$ :

$$\delta_x = \sigma E_x$$
$$0 = \delta E_y + \mu\delta_x B$$

puisque l'on suppose que le courant I de densité $\delta$ est dirigé suivant O$x$.

Il apparaît donc un champ électrique $E_y$ tel que

$$E_y = \frac{\mu\delta}{\sigma} B = -\frac{\delta}{ne} B$$

avec $\sigma = ne\mu$

On peut donc mesurer sur les faces latérales de la plaquette une différence de potentiel de Hall, telle que $V_H = bE_y$.

Comme le courant I est égal à $\delta bc$, la tension de Hall peut s'écrire

$$V_H = R_H \frac{BI}{c}$$

avec $R_H = -\mu/\sigma = -\mu\rho$

La constante de Hall $R_H$ est le produit de la mobilité par la résistivité du matériau considéré. On peut donc noter qu'on obtiendra une tension de Hall plutôt dans les semi-conducteurs que dans les métaux.

Si l'on considère la déformation des lignes de courant, on peut définir un angle $\theta$ de déviation.

$$\text{tg}\,\theta = -E_y/E_x$$

ou encore $\text{tg}\,\theta = -\mu B$

— *Application de la magnétorésistance.* Les sondes à magnétorésistance sont fabriquées surtout avec des semi-conducteurs qui ont une sensibilité bien plus grande que les métaux, ainsi l'antimoniure d'indium (InSb) dont la résistivité est de $6 \cdot 10^{-15}$ Ωm et le coefficient de Hall de $2{,}4 \cdot 10^{-4}$.

On réalise des plaquettes de très petites dimensions ayant une résistance de 10 à 500 Ω à base de l'eutectique InSb-NiSb. On obtient un angle $\theta$ de 80° pour une induction magnétique de 1 tesla, ce qui entraîne une augmentation considérable de la résistance pure dans le rapport $1 + \text{tg}^2\theta$, soit ici de 40.

## Capteurs à inductance variable

* *Réluctance d'un circuit magnétique*

La loi de Lenz nous donne pour un circuit parcouru par un courant I variant de $dI$ une force électromotrice $e$ s'opposant à la variation de courant, telle que

$$e = - L\frac{dI}{dt}$$

où L est la self-inductance du circuit.

Pour une bobine constituée de N spires enroulées sur un noyau magnétique de perméabilité $\mu$, on peut écrire :

$$L = N^2/\mathcal{R}$$

où $\mathcal{R}$ est la réluctance du circuit magnétique. Ainsi, si cette bobine de N spires est parcourue par un courant I, le flux à travers le circuit magnétique est

$$\Phi = LI = \frac{N^2 I}{\mathcal{R}} = N\Phi_0$$

c'est-à-dire N fois le flux $\Phi_0$ résultant de l'action de la force magnétomotrice $\mathcal{M} = NI$ dans une section du circuit magnétique de réluctance $\mathcal{R}$, et on a donc

$$L = \frac{N}{I}\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{R}}$$

Il est ainsi possible de provoquer des variations de la self-inductance par des variations de réluctance. Usuellement, on n'agit pas sur la force magnétomotrice pour faire varier L.

* *Variation de réluctance d'un circuit magnétique*

Si le circuit magnétique est formé de plusieurs constituants ayant des perméabilités différentes ainsi que des dimensions différentes, on a

$$\mathcal{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\mu_i}\frac{l_i}{S_i}$$

Dans le cas d'un circuit magnétique de section uniforme coupé par un ou plusieurs entrefers :

$$\mathcal{R} = \sum \frac{1}{\mu_0}\frac{l_0}{S_0} + \frac{1}{\mu}\frac{1}{S}$$

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0}\left(\sum \frac{l_0}{S_0} + \frac{1}{\mu_r}\frac{1}{S}\right)$$

Une variation de réluctance peut être obtenue par une action sur tous les termes figurant dans la parenthèse.

— *Variation de la longueur d'un entrefer.* Examinons le circuit magnétique de la *figure* 6. Soit $e/2$ l'entrefer élémentaire et $l$ la longueur moyenne des lignes de force dans le fer, S la section de passage du flux dans le fer et dans les entrefers

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu}\frac{1}{S} + \frac{1}{\mu_0}\frac{e}{S} = \frac{1}{\mu_0 S}\frac{1}{\mu_r} + e$$

si $\mu_r$ est suffisamment grand, on aura $e\mu_r \gg 1$ et ainsi

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 S} e$$

La variation d'induction sera telle que :

$$L = \mu_0 \frac{S}{e} N^2 \qquad \frac{\Delta L}{L} = - \frac{\Delta e}{e}$$

L'étendue linéaire du déplacement $\Delta e$ est relativement faible. On se limite à ce que $\Delta e/e$ reste inférieur à 10 %.

On utilise plutôt un circuit symétrique comportant deux inducteurs variant en sens inverse (*fig.* 7). Il y a deux enroulements placés sur deux demi-circuits magnétiques en M, avec une armature mobile commune. Cette armature est placée, au repos, au milieu de l'entrefer, c'est-à-dire que la distance entre chaque armature est $e$. Si on suppose que la contribution de l'entrefer à la réluctance du circuit est bien plus importante que celle des masses magnétiques ($\mu_r \gg 1$), la variation globale de la self-inductance L est proportionnelle à

$$\Delta L = \frac{K}{e - \Delta e} - \frac{K}{e + \Delta e} = - K\frac{2\,\Delta e}{e^2 - \Delta e^2} - \frac{2\,\Delta e}{e^2} K$$

où

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{2\,\Delta e}{e}$$

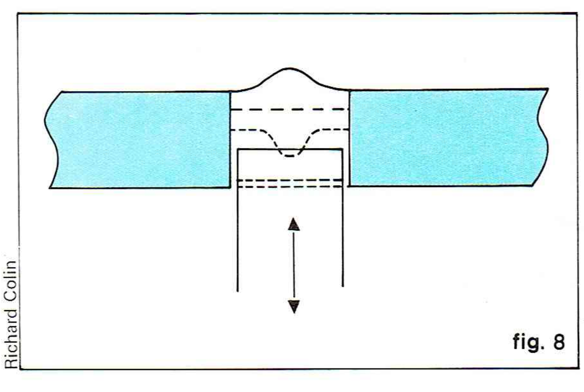
Ceci s'applique en particulier à la réalisation de capteurs ayant une résolution de 0,1 à 1 μm. Pratiquement, on limite les étendues linéaires de mesure à quelques millimètres.

— *Variation de la section de l'entrefer.* Si, dans le cas de la *figure* 6, on déplace la pièce mobile transversalement, on fait varier la section de l'entrefer ; on aurait ici aussi

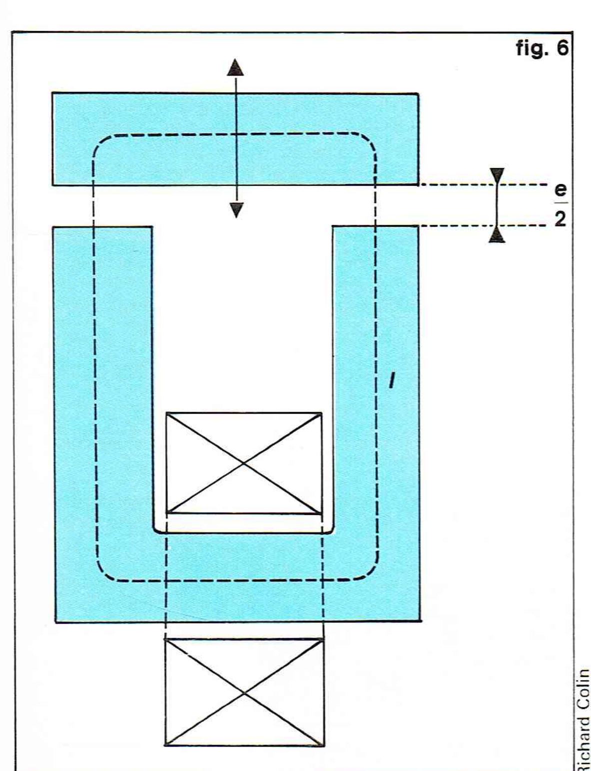
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta S}{S}$$

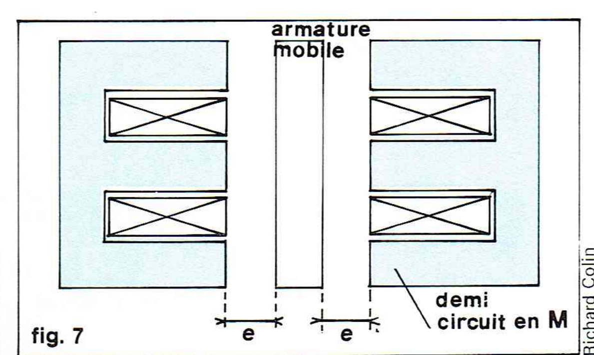
La linéarité n'existe qu'autant que le flux de fuite est négligeable, c'est-à-dire que la variation de section S est prépondérante. Pratiquement, on se limite encore à une variation relative de la section de 10 %.

Le shunt magnétique répond également à une variation de section d'un entrefer (*fig.* 8). Toutefois, son domaine

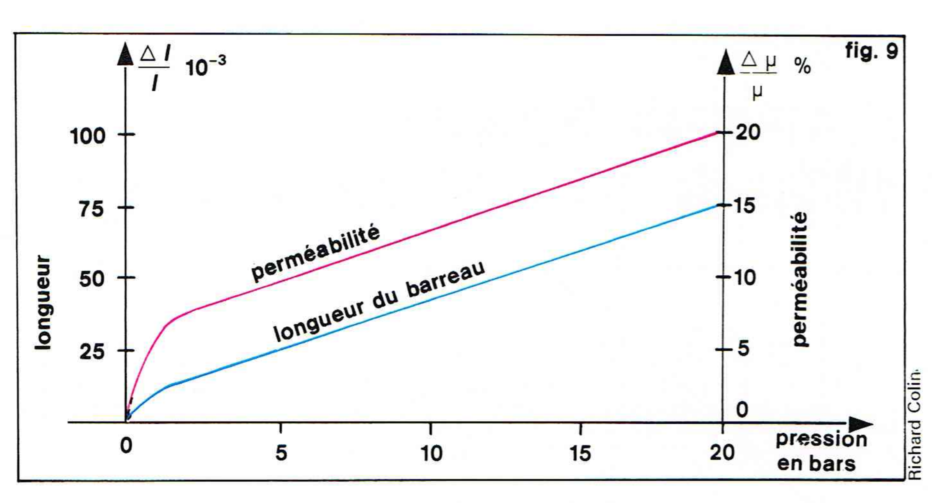


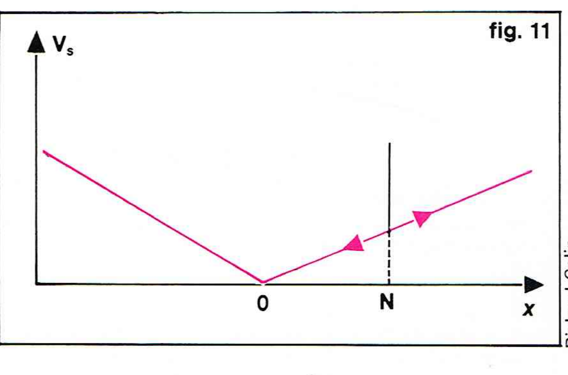

◀ ***Figure 8 :** shunt magnétique permettant la variation de la section de l'entrefer (capteurs à réluctance variable).*




◀ ***Figure 6 :** circuit magnétique permettant la variation de la réluctance par la variation de la longueur de l'entrefer (capteur à inductance variable).*
***Figure 7 :** circuit magnétique symétrique comportant deux inducteurs variant en sens inverse ; ce type de circuit, comme celui de la figure 6, permet une variation de la réluctance par la variation de la longueur de l'entrefer.*




▲ *Figure 9 : variation relative de la perméabilité des ferronickels du groupe Permalloy à 40-70 % de nickel, et variation relative de la longueur du barreau en fonction de la pression.*
*Figure 11 : tension de sortie fournie par le transformateur différentiel de la figure 10, en fonction du déplacement du noyau.*

d'application se limite surtout à la génération d'impulsions, la loi de variation n'étant pas linéaire. L'avantage de ce circuit est la grande profondeur de modulation qu'il permet d'obtenir, la variation relative de self-inductance pouvant être de 20 %.

— *Variation de la perméabilité. Magnéto-élasticité.* La perméabilité des matériaux ferromagnétiques (les ferronickels du groupe Permalloy à 40-70 % de nickel en particulier) varie lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. La *figure* 9 donne la variation relative de la perméabilité en fonction de la pression ainsi que la variation relative de la longueur du barreau sur lequel les mesures ont été faites.

* *Variation d'induction mutuelle*

On peut imaginer d'innombrables procédés pour faire varier l'induction mutuelle de deux enroulements. Généralement, on utilise un montage différentiel soit en déplaçant la bobine d'induction entre deux bobines inductrices, soit en déplaçant la bobine inductrice entre deux bobines d'induction, ou encore par déplacement d'un noyau magnétique entre les différentes bobines.

On peut avoir, par exemple, le transformateur différentiel variable de la *figure* 10. Trois enroulements sont bobinés autour d'un noyau magnétique pouvant se déplacer longitudinalement. Celui du milieu est le primaire du transformateur, les deux secondaires sont reliés de manière que les enroulements soient en opposition. A la position de repos, l'inductance mutuelle de chaque secondaire avec le primaire est identique, de telle sorte que la tension de sortie est nulle. Pour un déplacement donné du noyau, il y a déséquilibre des deux tensions secondaires et opposition d'une tension en sortie, conformément à la *figure* 11. De manière à pouvoir détecter le sens du déplacement, on ne travaille pas autour de 0 mais autour d'un point N comme cela est représenté sur la figure. Cela permet également d'avoir une bonne linéarité du transducteur.

La sensibilité des capteurs du commerce est de l'ordre de 0,5 à 3 mV pour un déplacement de 25 microns par volt appliqué à l'enroulement primaire. La sensibilité varie également avec la fréquence de la tension d'alimentation. Cependant, cette variation est relativement lente, de sorte qu'une régulation de fréquence précise de la source d'alimentation n'est généralement pas nécessaire.

### Capteurs à capacité variable

Un condensateur plan dont les armatures de surface S sont espacées de *e* avec un diélectrique de permittivité ε a une capacité :

$$C = \varepsilon \frac{S}{e}$$

Il sera donc possible de faire varier la capacité en faisant varier la permittivité, la surface ou l'épaisseur du condensateur.

— *Variation de la surface.* C'était le moyen le plus utilisé pour faire des condensateurs variables. Le diélectrique est l'air avec ε = 8,859 pF/m. La forme des lames peut servir à l'établissement d'une loi de variation quelconque : linéaire, logarithmique ou autre.

— *Variation de la distance entre les armatures.* La loi de variation n'est pas linéaire mais hyperbolique. Pour de faibles variations de l'épaisseur, on pourra, avec une approximation de quelques %, considérer la réponse comme linéaire.

— *Variation de la constante diélectrique.* En déplaçant une lame diélectrique entre les armatures, on peut obtenir une loi de variation quelconque suivant la forme donnée à la lame.

Souvent, les capteurs capacitifs sont utilisés pour mesurer des niveaux de liquides suivant la *figure* 12.

$$C = C_0 + C_1 + C_2$$

où C est la capacité totale
$C_0$ la capacité parasite
$C_1$ la capacité des lames immergées
$C_2$ la capacité des lames émergées dans l'air.

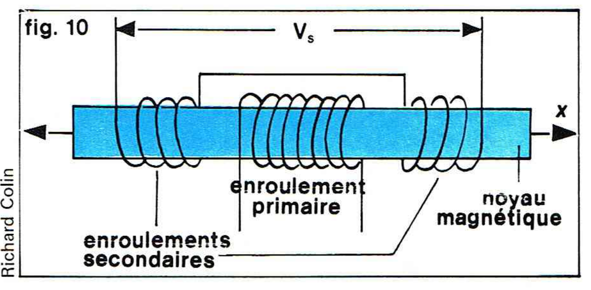
$$C = C_0 + \frac{\varepsilon_0 l}{e}[\varepsilon'_r x + \varepsilon_r (h - x)]$$

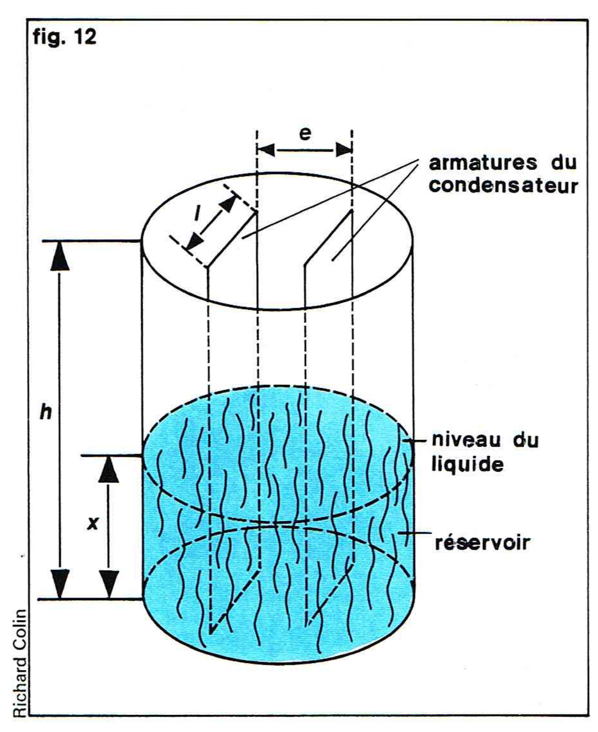
soit $C = a + bx$

On obtient bien une indication proportionnelle au niveau du liquide *x* dans le réservoir.



▶ *Figure 10 : transformateur différentiel variable comprenant trois enroulements bobinés autour d'un noyau magnétique pouvant se déplacer longitudinalement (capteur à inductance mutuelle).*
*Figure 12 : condensateur plan (capteur à capacité variable) servant à la mesure des niveaux liquides.*



## *Détecteurs optiques*

Les dispositifs capables de détecter les fréquences optiques sont multiples dans leurs principes et dans leurs possibilités. Les détecteurs optiques utilisent les effets suivants : émission électronique (tube photomultiplicateur) ; modification des caractéristiques électriques (photoconducteurs) ; déformation mécanique (cellule pneumatique de Golay) ; modification de la nature chimique (émulsion photographique).

Seuls les trois premiers permettent d'obtenir directement un signal électrique représentant l'information. Nous décrirons quelques éléments utilisant la photoélectricité.

### *Rappel des propriétés générales relatives à l'utilisation des sources ou des détecteurs optiques*

**Fréquence, longueur d'onde, énergie des radiations**

Les différentes radiations sont caractérisées par leur fréquence $\nu$. La longueur d'onde $\lambda$ est liée à la fréquence $\nu$ et à la vitesse de propagation $c$ pour un milieu transparent considéré.

$$\nu = c/\lambda$$

L'énergie d'une radiation se traduit par la loi de Planck :

$E = h\nu$ ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J · s, constante de Planck).

**Lois de rayonnement des corps incandescents**

Les liquides et les solides portés à une température élevée émettent des radiations formant un spectre continu qui ne sont qu'approximativement régies par les lois de rayonnement du « corps noir ». Celui-ci est caractérisé par le fait qu'il absorbe toutes les radiations qu'il reçoit, quelle que soit leur longueur d'onde, alors que tous les corps réels émettent ou absorbent sélectivement certaines fréquences ou bandes de fréquences.

**Quantités énergétiques relatives aux radiations**

* *Flux d'énergie irradié par la source.* Une source S a toujours trois dimensions. Elle émet un flux $\Phi$ représentant une certaine quantité d'énergie par seconde.

* *Flux transporté par un rayon.* Il existe toujours une ouverture ou diaphragme pour limiter le faisceau lumineux. Ce flux dépend de l'énergie de la source et de la configuration géométrique du faisceau (*fig.* 13).

* *Intensité d'un point de la source dans une direction* $\Delta$ (*fig.* 14). La source n'est pas un point géométrique. Elle n'émet pas également dans toutes les directions. A la direction $\Delta$ on associe un angle solide élémentaire $d\Omega$ transportant le flux élémentaire $d\Phi$ :

$$I_\Delta = \frac{d\Phi}{d\Omega} \qquad I'_{\Delta'} = \frac{d\Phi'}{d\Omega'}.$$

Si l'intensité est constante quelle que soit la direction, nous avons une émission isotropique. L'intensité I se mesure en watts/stéradian.

* *Luminance.* Les différents points d'une source peuvent émettre différemment. Soit $dI$ l'intensité émise par l'élément $dS$ de la source S (*fig.* 15) :

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha}$$

$dS \cos \alpha$ représente la surface sous laquelle est vu l'élément $dS$ dans la direction $\Delta$. L se mesure en watts/stéradian · m$^2$.

* *Étendue du faisceau* (*fig.* 16). Le faisceau est limité par deux ouvertures $dS$ et $dS'$. L est la luminance du point M.

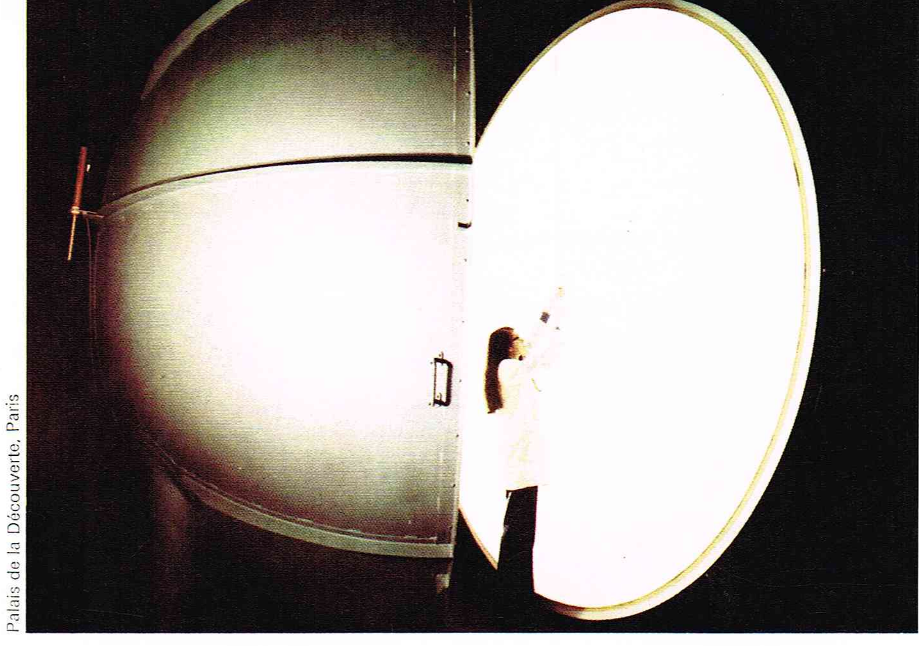
$$dI = L dS \cos \alpha \quad \text{dans la direction } \Delta$$
$$d^2\Phi = dI d\Omega$$
$$d^2\Phi = L dS \cos \alpha d\Omega.$$

En tenant compte de la symétrie entre $dS$ et $dS'$, on peut écrire (il y a conservation du flux lumineux) :

$$d^2\Phi = L dS' \cos \alpha' \, d\Omega'.$$

Soit donc le facteur géométrique noté $d^2E$ :

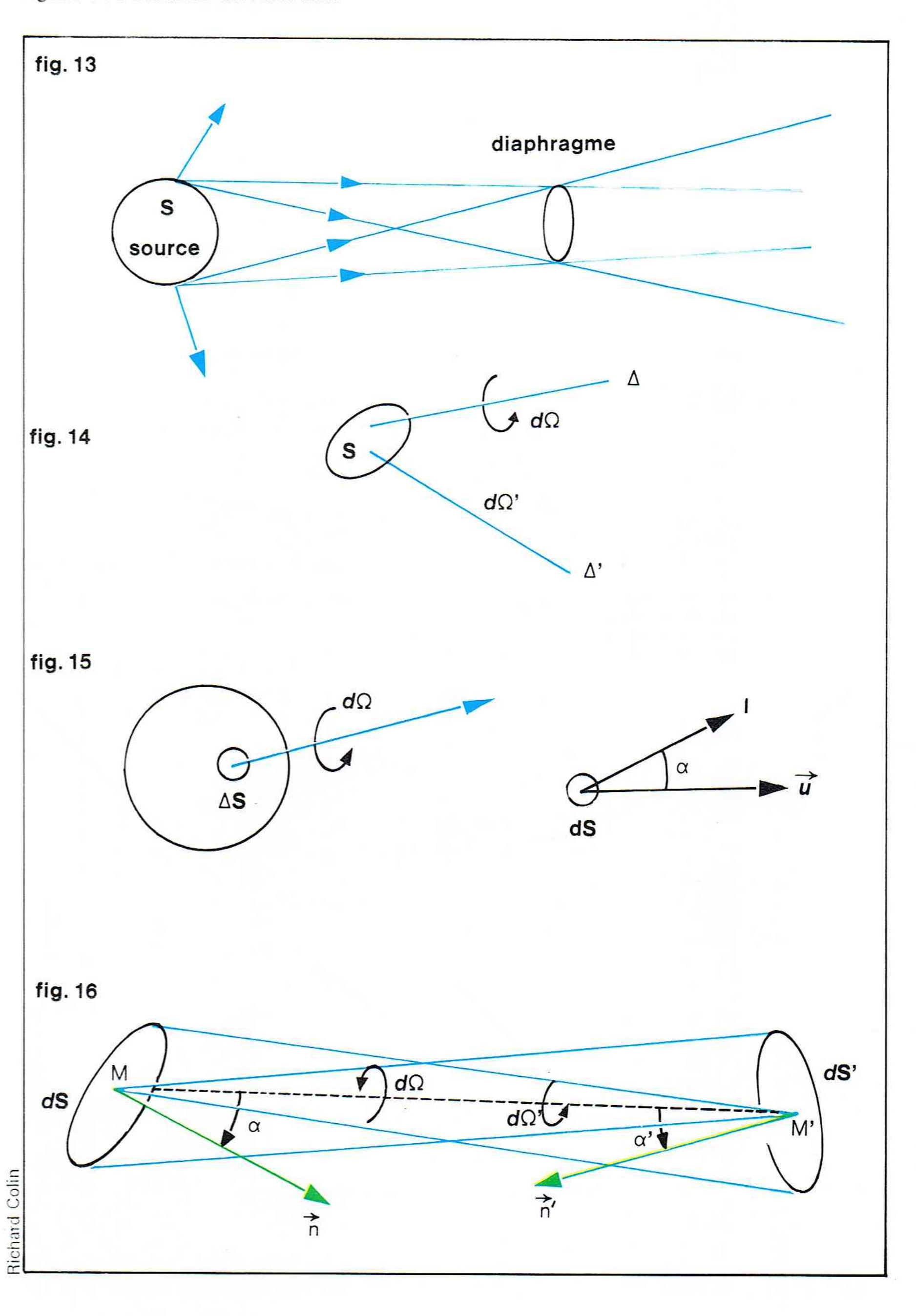
$$d^2E = dS \cos \alpha \, d\Omega$$
$$d^2E = dS' \cos \alpha' \, d\Omega'$$
$$d^2E = \frac{dS \cdot dS' \cos \alpha \cos \alpha'}{d^2}$$



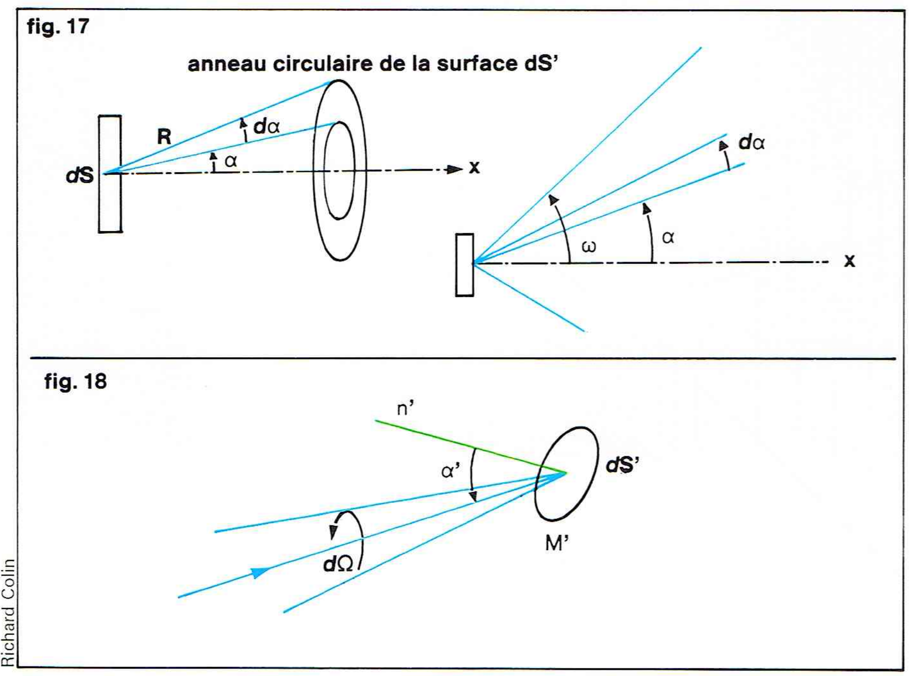
Palais de la Découverte, Paris

▲ *Installation pour la comparaison des lampes-étalons photométriques.*

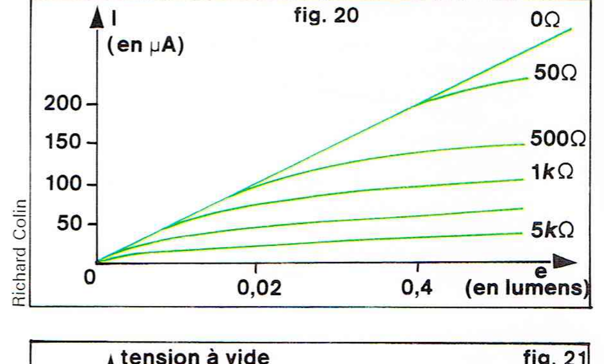
▼ *Détermination de quantités énergétiques relatives aux radiations ; figure 13 : flux transporté par un rayon ; figure 14 : intensité lumineuse ; figure 15 : luminance ; figure 16 : étendue du faisceau.*



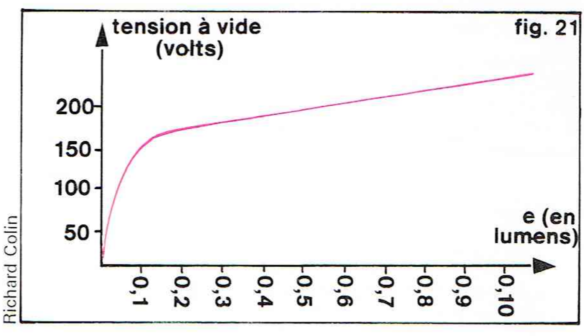

Richard Colin



Richard Colin



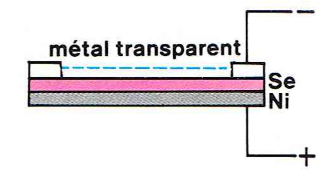
Richard Colin



Richard Colin

▲ ***Figure 17 : émittance d'une source lumineuse; figure 18 : illumination d'un écran.***

fig. 19




▲ ***Figure 19 : représentation schématique d'une photopile au sélénium.***
▼ ***Un générateur électrique à photopiles présenté au salon du Bourget (France).***

avec $d\Omega = \frac{d\Omega \cos \alpha}{d^2} = \frac{dS' \cos \alpha'}{d^2}$

$d^2E$ est l'étendue géométrique du faisceau.

★ *Émittance de la source* (*fig.* 17). Par définition, la radiance ou émittance H d'une source est le flux dans tout l'espace avant, par unité de surface :

$$d^2E = dS \cos \alpha \, d\Omega$$
$$d\Omega = 2\,\pi R \sin \alpha \, d\alpha$$
$$dE = \pi dS \sin^2 \omega$$

soit, pour un espace avant de la source correspondant à $\omega = \pi/2$ :

$$dE_0 = \pi dS.$$

Dans la mesure où la luminance L reste constante quand $\alpha$ varie :

$$d^2\Phi = L d^2E$$
$$d\Phi = L \int d^2E = L dE$$

et pour tout l'espace avant de la source ($2\,\pi$ stéradians) :

$$dE_0 = \pi dS$$
$$d\Phi_0 = L\pi dS.$$

Pour l'unité de surface définissant ainsi l'émittance :

$$H = \frac{d\Phi_0}{dS} = \pi L$$
$$H = \pi L.$$

★ *Illumination d'un écran* (*fig.* 18). $e = \frac{d\Phi}{dS'}$ se mesure en watts/m². L'illumination de l'écran dépend donc : de la luminance du rayon incident; de l'angle $\alpha'$ d'inclinaison sur la normale; de l'angle solide $d\Omega$ sous lequel on voit le rayon M'.

★ *Flux transporté par unité de longueur d'onde*. Si on suppose que le flux transporté par un faisceau limité en longueur d'onde entre $\lambda$ et $\lambda + d\lambda$ est $d\Phi$ :

$$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}.$$

Ainsi, on définit :

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad H_\lambda = \frac{dH}{d\lambda}$$
$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} \quad e_\lambda = \frac{de}{d\lambda}$$

### *Photo-électricité*

#### Effet photovoltaïque (photopiles)

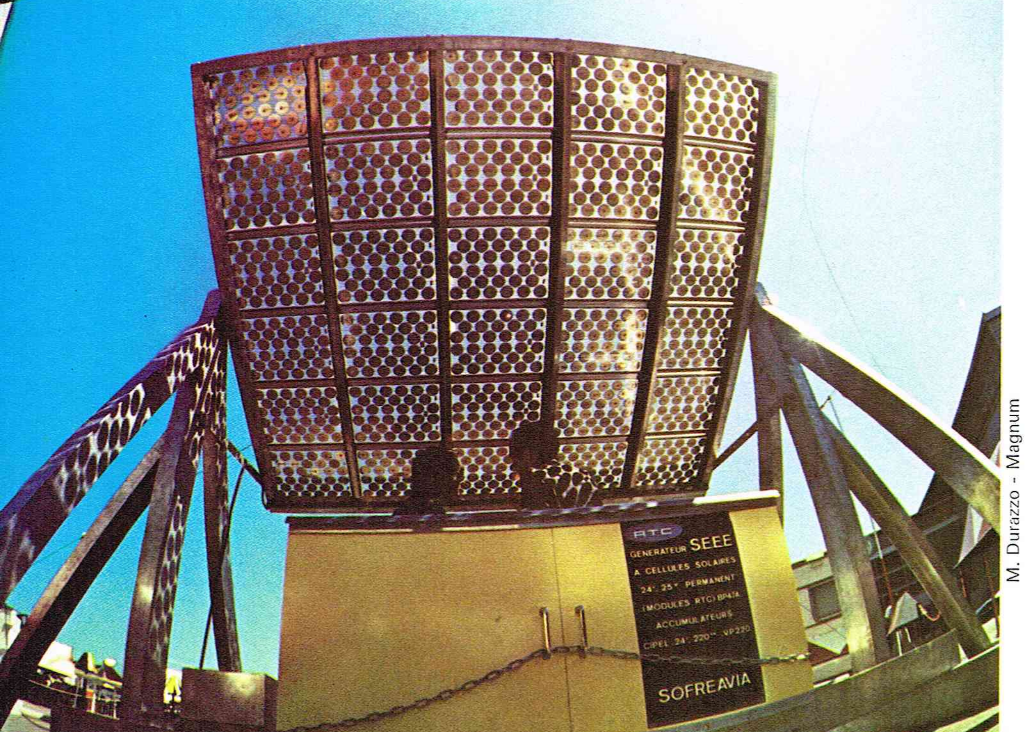
Les photopiles ne nécessitent aucune source extérieure d'énergie. Fermées sur une résistance extérieure, elles débitent du courant électrique dont l'intensité est liée au flux lumineux qu'elles reçoivent. Ce sont des convertisseurs directs d'énergie.

Examinons la photopile au sélénium constituée essentiellement (*fig.* 19) d'une plaque en nickel qui sert de support à une couche de sélénium. Cette couche est semi-conductrice de type P. Afin d'obtenir une jonction P-N, on dépose sur la surface du sélénium un film métallique très mince, bon conducteur et très transparent à la lumière. La caractéristique tension-courant d'une telle cellule reliée à une source extérieure d'énergie est non linéaire. Il existe un effet redresseur lié à l'existence de la jonction.

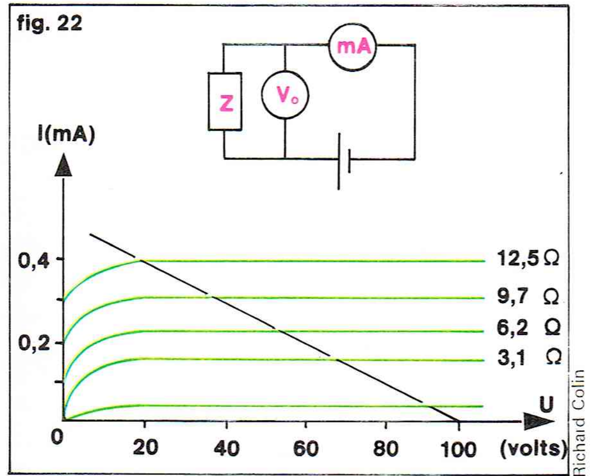
Quand elle est éclairée, la photopile mise en court-circuit fournit un courant proportionnel à l'éclairement. Quand on ferme le circuit sur différentes résistances, on obtient les courbes de la *figure* 20 du courant en fonction de l'éclairement. La sensibilité moyenne des photopiles au sélénium est de 500 μA par lumen. A vide, la tension aux bornes de la photopile atteint rapidement un palier (*fig.* 21).

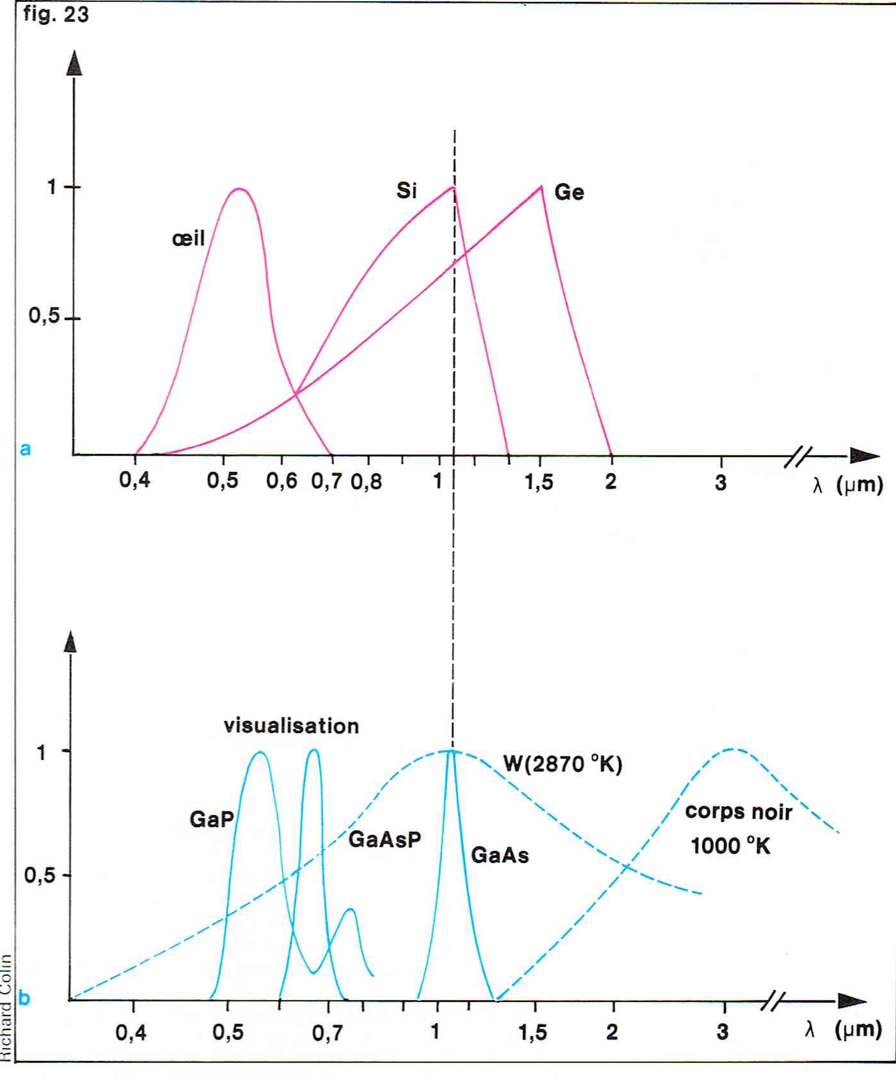
La courbe de sensibilité chromatique se rapproche de celle de l'œil, centrée sur 6 000 Å, elle chute rapidement pour n'être plus que de 20 % à 5 000 Å et 15 % à 7 000 Å.

De telles photopiles ont une capacité importante de l'ordre de 0,1 μF par cm² interdisant leur emploi pour la détection de flux lumineux rapidement variables.



M. Durazzo - Magnum




▲ ***Figure 22 :*** ***caractéristique* UI *d'une photodiode pour différents éclairements.***
***Figure 23 :*** ***réponses spectrales relatives d'un certain nombre de corps utilisés comme détecteurs* (a) *ou comme émetteurs* (b) *dans une photorésistance.***

### Photodiodes et phototransistors

On utilise ici l'effet photovoltaïque dans le silicium. Il s'agit en fait d'une jonction P-N constituant une diode que l'on polarise en sens inverse. La lumière crée des paires électron-trou séparées par le champ important de la zone de déplétion, qui permettent ainsi au courant de passer. La *figure* 22 montre la caractéristique U. I. d'une photodiode pour différents éclairements.

La sensibilité est de l'ordre de 10 à 30 mA par lumen. Cette sensibilité peut être augmentée en utilisant l'amplification de courant inhérente au transistor. En construisant un dispositif à deux jonctions N-P-N dont on peut éclairer une jonction, on réalise un phototransistor. La sensibilité est ainsi portée à 3 A par lumen.

### Effet photoconducteur

Les photorésistances sont constituées d'un semi-conducteur auquel on applique une tension continue de quelques dizaines de volts : sulfure de plomb, sulfure de thallium, sulfure de cadmium ou séléniure de cadmium. Le rayonnement incident crée des porteurs de charge supplémentaires se superposant à un faible courant d'obscurité, si bien que la résistance globale chute.

Ces photorésistances diffèrent surtout par leur seuil photo-électrique (c'est-à-dire par la valeur de la longueur d'onde du rayonnement incident pour laquelle la sensibilité n'atteint que 50 % de sa valeur maximale), mais aussi par la valeur de cette sensibilité maximale et par le courant d'obscurité. La *figure* 23 donne les réponses spectrales d'un certain nombre de corps utilisés soit comme détecteurs (courbes du haut), soit comme émetteurs (courbes du bas).

## *Capteurs photo-électriques*

On peut faire un classement des phénomènes physiques permettant de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique :

— *Cellules photo-émissives :* cellules à vide; cellules à gaz; photomultiplicateurs.

— *Dispositifs à semi-conducteurs :* photorésistances; photodiodes; phototransistors; cellules à couche d'arrêt.

Mais on se limitera à l'étude des dispositifs mettant en jeu le phénomène de photorésistance.

### Rappel des unités photométriques

* *Unité d'intensité lumineuse : la candela*. Par définition, on attribue une luminance de 60 candelas/cm² au rayonnement du corps noir à la température de fusion du platine (2 028 °K). La valeur de la candela est très voisine de l'ancienne « bougie internationale ».

* *Unité de flux lumineux : le lumen*. Étant donné une source lumineuse ayant une intensité de 1 candela dans toutes les directions (elle rayonne dans un angle solide de 4 $\pi$), le lumen est le flux rayonné par cette source dans un angle solide unité.

Pour une longueur d'onde égale à 0,555 $\mu$m, 1 watt correspond à 621 lumens. Par contre, une énergie de 1 watt rayonnée sous forme de lumière blanche (lampe à incandescence) ne correspond qu'à 250 lumens et exige une dépense de 40 watts (l'infrarouge n'impressionne pas l'œil).

* *Unité d'éclairement : le lux*. Le lux correspond à l'éclairement d'une surface de 1 m² recevant un flux de 1 lumen.

* *Unité de brillance : le stilb*. Le stilb est la luminance de 1 candela/cm².

### Généralités sur les récepteurs photosensibles

On se limitera essentiellement aux dispositifs à semi-conducteurs les plus courants.

* *Principe*

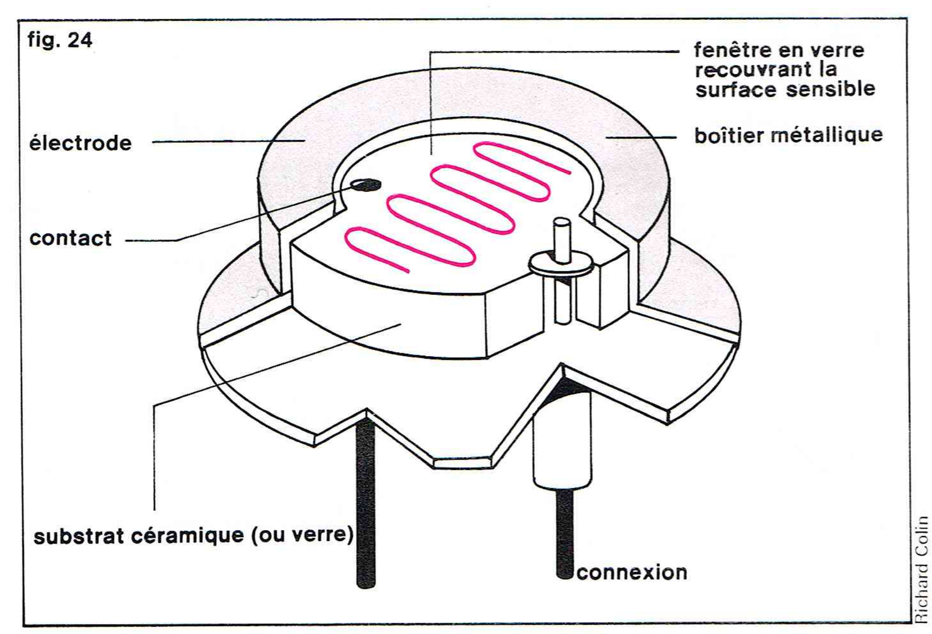
Quand l'énergie $h\nu$ d'un photon est juste suffisante pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, on assiste à une diminution de la résistivité du corps envisagé. Ce phénomène est mis à profit dans les cellules photorésistantes.

Dans un élément photosensible à jonction, si un photon $h\nu$, d'énergie supérieure à l'énergie d'activation du semi-conducteur, tombe sur la jonction polarisée en sens inverse, il libère à l'intérieur de la zone de charge d'espace une paire électron-trou. A cause du très fort champ électrique régnant au niveau de cette jonction, les charges sont collectées pour donner naissance à un courant (dit courant photo-électrique) pratiquement proportionnel à l'énergie lumineuse qui lui a donné naissance.

* *Photorésistances* (*fig.* 24). Elles sont caractérisées par leur grande sensibilité et leur faible prix de revient.

Parmi les nombreux corps présentant une résistivité très élevée dans l'obscurité et diminuant sous l'action de la lumière, on peut citer les suivants : le germanium; le silicium; le sulfure, le séléniure et le tellurure de plomb; l'antimoniure d'indium; le sulfoséléniure de cadmium. Dans le domaine du visible et du proche infrarouge, on utilise le sulfure, le séléniure et le sulfoséléniure de cadmium.

◀ ***Page ci-contre, en haut, à droite figure 20 :*** ***courbes de l'intensité du courant donné par une photopile mise en circuit avec différentes résistances, en fonction de l'éclairement;*** ***figure 21 : tension à vide aux bornes d'une photopile, en fonction de l'éclairement.***




▲ *Figure 24 : coupe schématique d'une photorésistance.*

Dans le domaine de l'infrarouge, on utilise le silicium ($\lambda_{max}$ = 0,9 µm), le sulfure de plomb ($\lambda_{max}$ = 2,5 µm), le séléniure de plomb ($\lambda_{max}$ = 3,4 µm), l'antimoniure d'indium ($\lambda_{max}$ = 6,8 µm), le germanium avec différents dopages (dopé à l'or, $\lambda_{max}$ = 5 µm ; dopé au mercure, $\lambda_{max}$ = 10,5 µm ; dopé au cadmium, $\lambda_{max}$ = 16 µm ; dopé à l'antimoine, $\lambda_{max}$ = 20 µm ; dopé au cuivre, $\lambda_{max}$ = 23 µm ; dopé au zinc, $\lambda_{max}$ = 35 µm).

Les principales caractéristiques des résistances photosensibles sont :

— *la résistance d'obscurité :* mesure faite au moins 20 secondes dans l'obscurité ; ce paramètre est généralement désigné par $R_0$ et varie de $10^4$ à $10^9$ Ω ;
— *la résistance pour un éclairement donné de* 100 lux ;
— *la dissipation maximale* (comprise en général entre 50 mW et 1 W) ;
— *la tension maximale admissible* aux bornes de la photorésistance non éclairée ;
— *la réponse spectrale ;*
— *l'action de la lumière* sur la résistivité des photorésistances qui doit être pratiquement linéaire sur un large domaine d'éclairement (important pour les dispositifs à action proportionnelle) ;
— *le temps de réponse :* pour une cellule photorésistante, c'est le paramètre qui en limite l'emploi à des fréquences inférieures ou égales à 1 Hz.

**Remarques :** l'action de la température pour de forts éclairements peut être négligée mais peut affecter notablement la résistance d'obscurité $R_0$. Les cellules photorésistantes sont susceptibles d'avoir les formes les plus variées, donc d'être adaptables aux dispositifs les plus complexes.

* *Éléments photosensibles à jonction.* Le plus simple de ces éléments est la photodiode à jonction obtenue par le procédé planar. Si on réalise une diode plane à jonction dont la géométrie est étudiée de telle façon que la zone de charge d'espace soit égale ou supérieure à la profondeur de pénétration des photons, chacun des photons ayant l'énergie suffisante donnera naissance au niveau de la jonction à une paire électron-trou qui sera collectée par la jonction polarisée en sens inverse. Le courant sera proportionnel à l'intensité lumineuse incidente et à la surface de la région photosensible.

Il existe de nombreux dispositifs à couche mince (duo photodiode, diode P. I. N., phototransistors). Sans entrer dans le détail, on peut essayer de voir quelles sont leurs caractéristiques communes : la courbe de réponse spectrale est propre aux semi-conducteurs utilisés ; le courant d'obscurité propre au semi-conducteur utilisé (quelques centaines de picoampères à quelques microampères à la température ambiante pour le silicium et quelques centaines de microampères pour le germanium) ; la vitesse de réponse à une impulsion lumineuse à front raide qui détermine la fréquence maximale d'emploi en lumière modulée.

### Cellules sensibles aux infrarouges. Utilisation

La source lumineuse utilisée est la matière elle-même portée à une certaine température et émettant un rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge. Il existe deux catégories distinctes de cellules infrarouges : les cellules de détection et les cellules de régulation.

* *Les cellules de détection* délivrent des signaux logiques « tout ou rien » correspondant à la présence ou à l'absence de matière. Elles servent par exemple : au pistage des billettes, au cumul des longueurs, à l'étalonnage de tops pour une cisaille, à des mesures de vitesses linéaires, au déclenchement de séquences.

* *Les cellules de régulation* délivrent au contraire un signal analogique proportionnel à la position du produit dans leurs champs d'exploration.

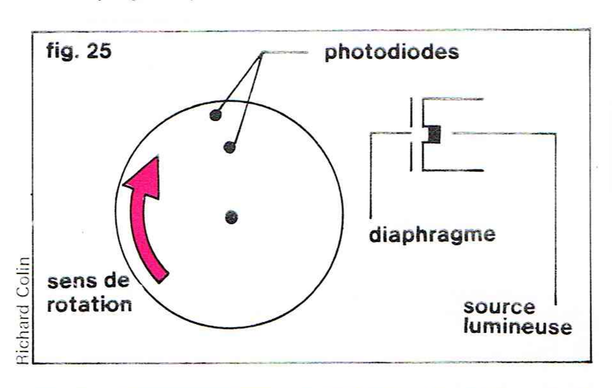
Les cellules pourront porter le nom de « détecteurs photoélectriques à amplificateurs incorporés ». Il faut en effet généraliser la notion de capteur, car une cellule photoélectrique donne habituellement un signal électrique déjà mis en forme. Elle comprend le transducteur proprement dit (cellule photorésistante par exemple) et un système optique permettant d'obtenir un éclairement correct de l'élément photosensible, ce dispositif ayant parfois comme autre fonction celle de moduler la lumière incidente ; le transducteur est associé à un amplificateur permettant la mise en forme du signal. Dans une cellule élaborée, on peut de plus trouver, par exemple, une source lumineuse de référence associée à un élément photosensible secondaire permettant de calibrer les informations.

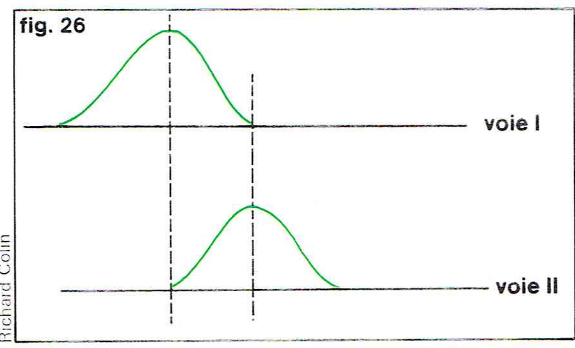
### Application des photodiodes : capteurs de sens de marche

Dans un dispositif utilisant un compteur de tops étalonnés qui permet de positionner un produit, il est souvent nécessaire de connaître le sens de déplacement de ce produit, c'est-à-dire le sens de la machine. On peut, pour ce faire, utiliser un dispositif qui fournira le sens du déplacement en indiquant si le compteur de tops est en comptage ou décomptage.

On considère une roue portant deux photodiodes (transducteurs) et une source lumineuse. Par mesure de sécurité, le système peut être doublé (*fig.* 25).

La *figure* 26 représente les signaux électriques donnés par les diodes. Ils sont amplifiés et mis en forme, et injectés dans un dispositif électronique logique capable de discriminer le sens de la marche (schéma de principe : *figure* 27, et principe de la discrimination : *figure* 28). Cette discrimination est envoyée au compteur de tops indiquant le positionnement du produit. Elle donne un ordre pour indiquer que l'on est en comptage ou en décomptage d'après la suite ABC ou la suite CBA.




▶ *Figure 25 : représentation très schématique d'un capteur de sens de marche comprenant deux photodiodes et une source lumineuse.*
*Figure 26 : signaux électriques délivrés par les deux photodiodes du capteur de sens de marche de la figure 25.*

## *Repérage des températures*

De nombreuses méthodes permettent de repérer la température d'un milieu, puisque tout paramètre physique variant avec la température peut être à la base d'une méthode de mesure. Nous distinguerons d'abord les capteurs dont le détecteur est en contact avec le milieu à contrôler (a) et les capteurs qui ne nécessitent pas ce contact, ces derniers faisant essentiellement appel à la thermométrie optique (b).

a — *Thermomètre à dilatation :* thermomètre à gaz; thermomètre à dilatation de liquide; thermomètre à dilatation de solide.

— *Thermométrie par changement d'état*, par exemple changement de couleur.

— *Thermométrie à résistance :* thermomètre à résistance; thermomètre à thermistance.

— *Thermométrie à couple thermo-électrique.*

b — *Thermométrie optique :* mesure du rayonnement total; mesure monochromatique.

Parmi ces différentes méthodes de mesure, seules celles qui s'effectuent au moyen de thermocouples, de lunettes à radiation totale et de résistances thermo-électriques permettent l'enregistrement. Le pyromètre optique à disparition de filament nécessite l'appréciation d'un opérateur.

### *Rappel des différentes lois relatives aux rayonnements des corps incandescents*

#### Loi de Kirchhoff

D'une façon générale, les radiations électromagnétiques émises possèdent toutes les longueurs d'onde. La puissance rayonnée par l'unité de surface du corps dans l'intervalle $d\lambda$ au voisinage de la longueur d'onde $\lambda$ est $H_\lambda d\lambda$; $H_\lambda$ est l'émittance énergétique monochromatique. Pour l'ensemble, on a donc :

$$H = \int_0^\infty H_\lambda d\lambda.$$

Le corps C rayonne mais aussi absorbe des radiations électromagnétiques. Si ce corps reçoit une puissance $\Phi_\lambda$ provenant de toutes les directions de l'espace, il réémet la puissance $\Phi'_\lambda$.

On pose que le coefficient d'absorption monochromatique est $a_\lambda$ avec

$$a_\lambda = \frac{\Phi_\lambda - \Phi'_\lambda}{\Phi_\lambda}$$

pour la longueur d'onde $\lambda$.

On peut démontrer la loi de Kirchhoff, que nous admettrons ici : il existe entre l'émittance énergétique monochromatique $H_\lambda$ et le coefficient d'absorption monochromatique $a_\lambda$ un rapport indépendant du corps considéré :

$$\frac{H_\lambda}{a_\lambda} = k.$$

Le facteur $k$ est fonction de la longueur d'onde $\lambda$ et de la température T.

Pour le corps noir, $a_\lambda = 1$ (corps idéal), c'est-à-dire :

$$H_\lambda = k.$$

Pour un corps réel, nécessairement $a_\lambda < 1$.

#### Loi de Stéfan

L'énergie totale émise par le corps noir à la température absolue T est de la forme :

$$H = PT^4$$

Il faut remarquer que l'échauffement d'un corps noir (voir *Pyrométrie à radiations totales*), de surface unité recevant la radiation $H = PT^4$ et placé dans une enceinte à la température $T_0$, est produit seulement par l'énergie

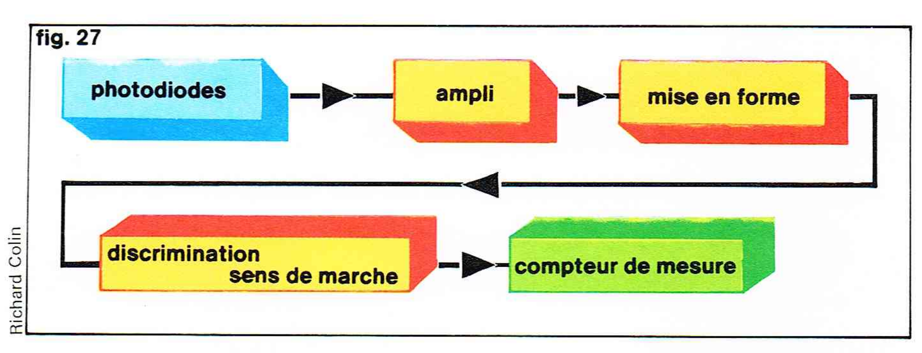
$$H = P\,(T^4 - T_0^4)$$

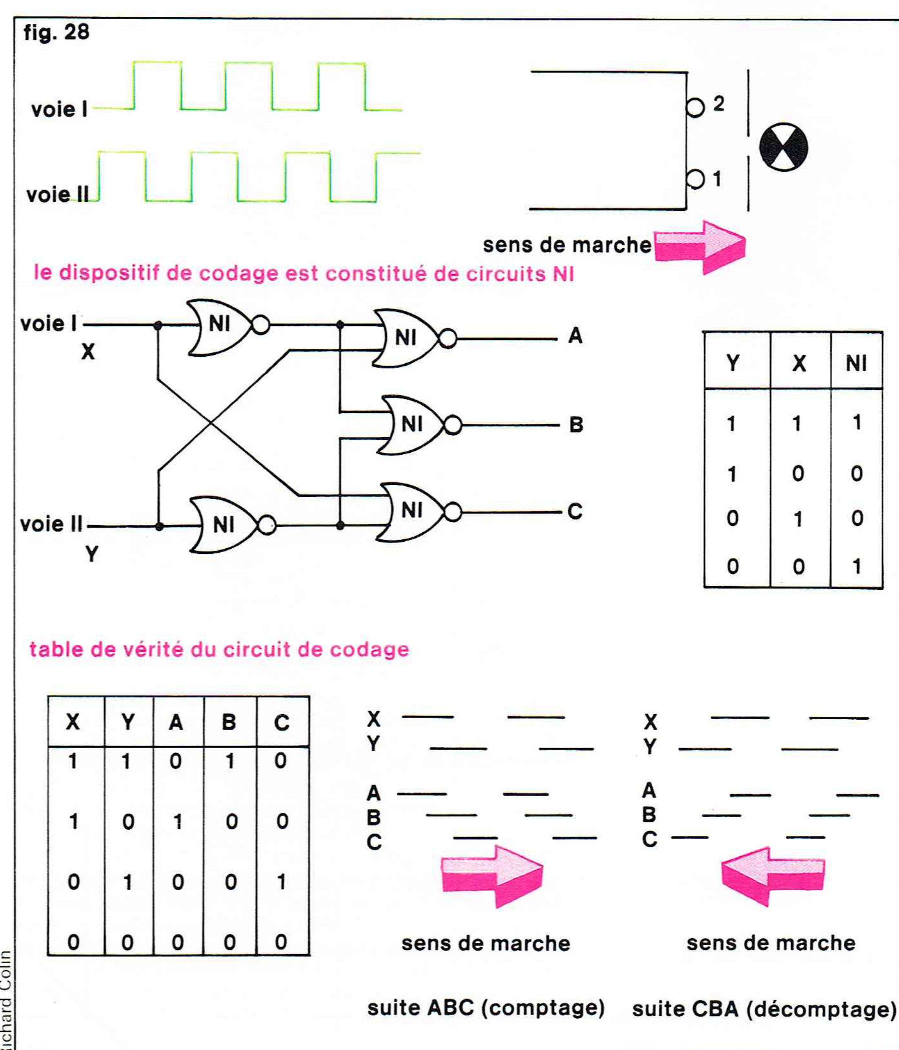
#### Loi de Planck

L'émittance énergétique monochromatique $H_\lambda$ est donnée en fonction de la température absolue T par la relation :

$$H\,(\lambda, T) = A \cdot \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{B}{\lambda T}} - 1}$$

$A = 1{,}185 \cdot 10^{-16}$ MKSA; $B = 1{,}43 \cdot 10^{-2}$ MKSA.




| Y | X | NI |
|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |

| X | Y | A | B | C |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

▲ ***Figure 27 :** schéma synoptique de l'électronique du capteur de sens de marche de la figure 25.* ***Figure 28 :** principe de discrimination dans le capteur de sens de marche de la figure 25.*

Cette formule permet de représenter correctement les résultats expérimentaux, et on vérifie qu'elle fournit la loi de Stéfan lorsqu'on calcule

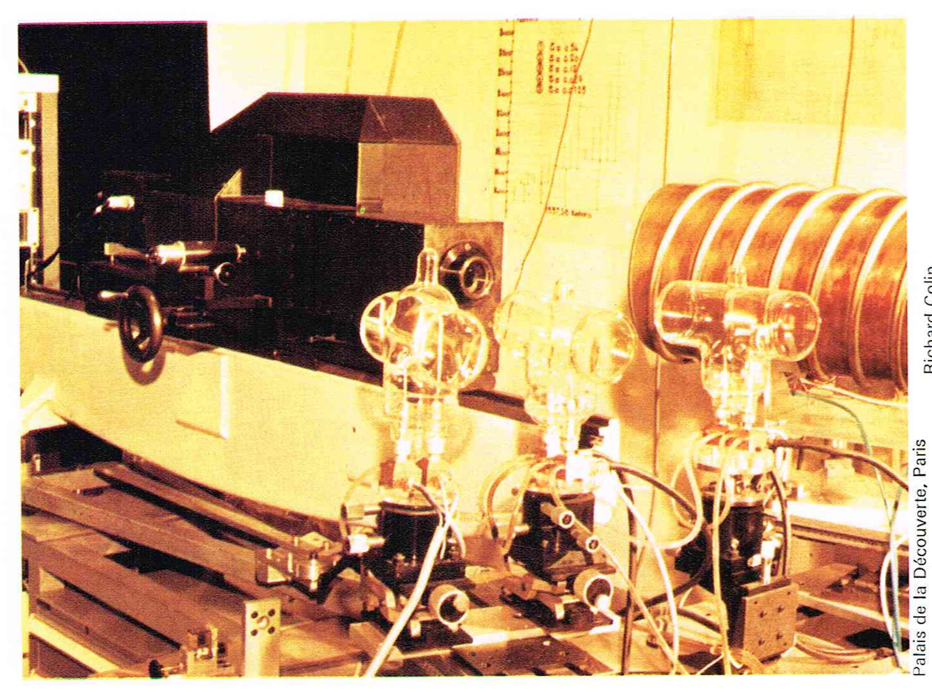
$$\int H_\lambda d\lambda.$$

### *Pyrométrie optique*

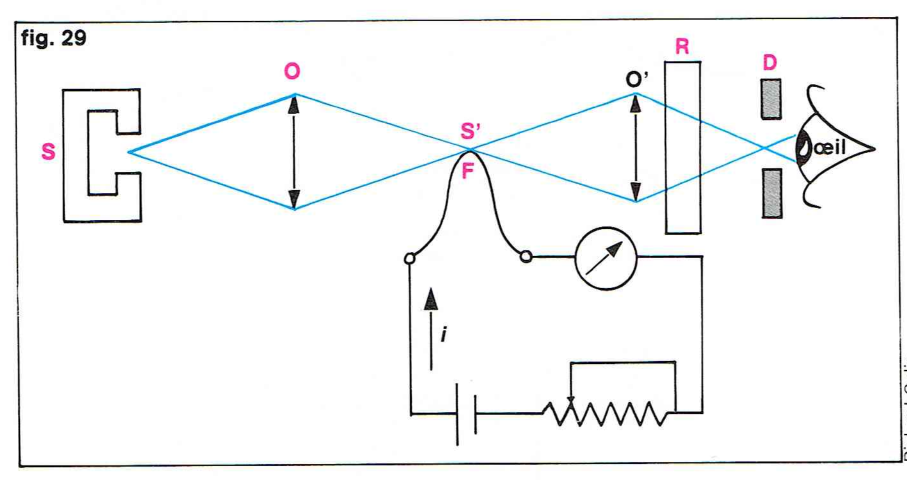
La pyrométrie optique utilise le rayonnement électromagnétique de la source dont on veut déterminer la température. Il existe trois grandes catégories de capteurs : le pyromètre monochromatique (utilisant une partie étroite du spectre visible); le pyromètre à radiation totale recevant tout le rayonnement de la source; le pyromètre à deux couleurs.

#### Le pyromètre à disparition de filament

Parmi les types de pyromètre monochromatique, ce modèle s'est imposé parce qu'il est facile à construire et à utiliser, qu'il est précis et qu'il est de plus capable de mesurer la température d'échantillons de très faibles dimensions.



Palais de la Découverte, Paris




Richard Colin

▲ *En haut, un pyromètre monochromatique. Ci-dessus, figure 29 : principe du pyromètre à disparition de filament. L'appareil a été préalablement étalonné à l'aide de sources de températures connues, en faisant correspondre à chacune d'entre elles l'intensité du courant entraînant la disparition du filament.*

▲▶ *Figures 31 et 32 : principe de la lunette et du télescope pyrométriques à radiation totale.*

* *Principe* (*fig.* 29).

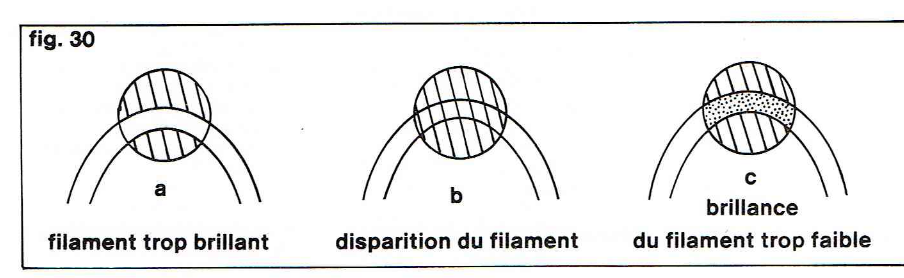
On compare la brillance du corps visé (S) à celle d'un filament de tungstène chauffé par effet Joule pour la longueur d'onde $\lambda = 0{,}65\ \mu m$ correspondant au filtre rouge (R) monochromatique. La lunette représentée sur la figure comprend :

— un objectif O donnant de la source à contrôler S une image S′ dans le plan du filament F d'une lampe-étalon ;

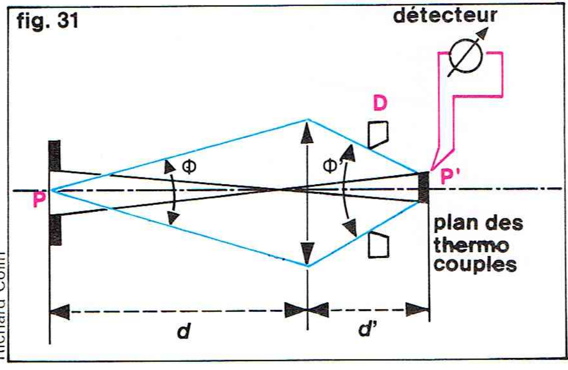
— un filtre rouge (R) déterminant la largeur de bande comprise entre $\lambda$ et $\lambda + d\lambda$, dans laquelle on effectue la comparaison des brillances de la source et du filament.

— L'œil placé derrière un diaphragme (D), par l'intermédiaire d'un oculaire O′, voit à la fois l'image de la source, S′, et le filament (*fig.* 30).

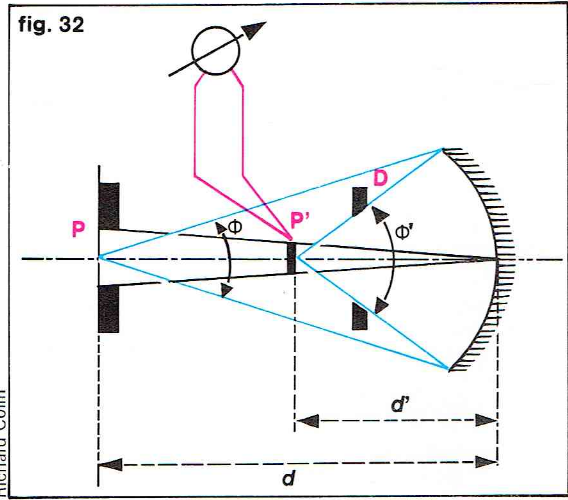
La température mesurée n'est exacte que si le corps visé est assimilable au corps noir. L'appareillage ne permet pas de faire des mesures à des températures inférieures à 800 °C.




Richard Colin




Richard Colin




Richard Colin

**Le pyromètre à radiation totale**

* *Principe*

Toutes les radiations émises par la source sont envoyées, grâce à un dispositif optique, sur un récepteur noirci, formé en général d'un simple disque mince. L'élévation de température de ce récepteur est mesurée par un couple sensible dont la soudure chaude est soudée sur le récepteur et dont les extrémités sont reliées aux bornes d'un appareil de mesure de force électromotrice. A chaque f. é. m. donnée correspond une température. Le principe de la mesure dérive de la loi qui lie la valeur W de l'énergie totale rayonnée par l'unité de surface du corps à la température de ce corps. Cette loi s'écrit :

$$H = PT^4 \qquad \text{(loi de Stéfan-Boltzmann)}$$

Le dispositif peut être un simple objectif en verre (lunette pyrométrique) : voir la *figure* 31 ; ou bien un miroir concave (télescope pyrométrique) donnant une image de la source sur le disque récepteur : voir la *figure* 32.

Soit S la surface utile de la source ;
S′ la surface des couples ;
Φ l'angle solide utile d'émission ;
Φ′ l'angle solide de réception ;
ε la surface utile de la lentille ;
*d* la distance de la source à la lentille ;
*d′* la distance de la lentille aux couples.

Le corps visé étant voisin du corps noir, l'énergie émise par le corps et reçue par la surface P′ est :

$$Q = \frac{H}{\pi} S \frac{\varepsilon}{d^2} = \frac{H}{\pi} \frac{S'}{d'^2}$$

or

$$H = PT^4$$

$$Q = \frac{PT^4}{\pi} \frac{S'}{d'^2} = P \frac{S'}{\pi} \Phi' T^4 = kS'T^4$$

Les thermocouples émettent aussi à une température T′

$$Q' = kS'T'^4$$

Si on néglige $T'^4$ devant $T^4$ la quantité de chaleur reçue par les couples est de la forme :

$$Q = kS'T^4$$

Il faut faire intervenir $t$, température en degrés centigrades du thermocouple, et $\theta$, température régnant à l'intérieur du système optique.

Si on appelle $\alpha$ le coefficient de convection et $r$ le coefficient de conduction :

$$kS'T^4 = 2\,S'\,(\alpha + r)\,(t - \theta)$$

soit

$$kT^4 = 2\,(\alpha + r)\,(t - \theta)$$

On s'arrange dans la construction de l'appareil pour que $\alpha$, $r$ et $\theta$ soient constants. Par conséquent, la température $t$ °C indiquée par les thermocouples n'est fonction que de T, la température de la source :

$$t = f\,(T)$$

* *Précisions de la mesure*

L'appareil est étalonné en utilisant une source se rapprochant le plus près possible du corps noir idéal. Pour une source réelle, il faut effectuer des corrections pour ne pas altérer la précision de la mesure.

● *Corps non noir*

L'énergie reçue par un corps réel est de la forme :

$$kH_T = kH_{0T}a_T = ka_T PT^4$$

où $H_T$ est l'émittance totale reçue par les thermocouples correspondant à l'énergie émise par le corps réel à la température T,

$H_{0T}$ l'émittance du corps noir à la même température T,

$a_T$ le coefficient d'absorption à la température T.

On considère que l'énergie rayonnée par le corps réel à la température T est la même que celle rayonnée par le corps noir à la température R, $R < T$.

$$a_T PT^4 = PR^4$$

$$T = R\frac{1}{\sqrt[4]{a_T}}$$

$$T = R + (T - R)$$

Ainsi, à la valeur lue, R, de la température, on ajoute le terme T — R donné par le *tableau* III.

$$T - R = R\left(\frac{1}{\sqrt[4]{a_T}} - 1\right)$$

Quand $a_T$ s'éloigne sensiblement de 1, les corrections deviennent trop importantes, et la mesure de la température par lunette à radiation totale perd beaucoup de son intérêt. De plus, il faut connaître $a_T$. Mais souvent, les mesures industrielles visent à la reproductibilité d'une température plus qu'à la connaissance de sa valeur exacte. Si les variations du pouvoir absorbant sont faibles, l'emploi des pyromètres à radiation totale est très satisfaisant. En outre, les conditions d'utilisation pour la mesure des températures à l'intérieur des foyers des fours sont suffisamment proches du corps noir idéal pour qu'on obtienne une température correcte avec la précision recherchée.

● *Erreurs dues aux phénomènes d'absorption*

L'atmosphère régnant entre la source et le capteur peut contenir des gaz (anhydride carbonique, vapeur d'eau) qui absorbent une partie du rayonnement.

* *Avantages et inconvénients du pyromètre à radiations totales*

Son principal avantage est de permettre un enregistrement automatique des températures, la f. é. m. du récepteur peut être en effet enregistrée à distance sur un millivoltmètre enregistreur.

Un premier inconvénient tient à l'échauffement des pièces optiques qui rayonnent vers le récepteur et perturbent la graduation. Le second, plus grave, tient à l'absorption partielle des infrarouges par les gaz transparents tels que le gaz carbonique et la vapeur d'eau, perturbation difficilement chiffrable. Pour éviter ce double inconvénient, dans les installations destinées à l'enregistrement, on est amené à entourer tout le pyromètre d'une gaine à circulation d'eau et à le pointer dans un tube réfractaire fermé, plongé dans le four et dans lequel on fait passer un courant d'air de façon à chasser les gaz absorbants. De plus, il faut faire les corrections de pouvoir émissif (voir le *tableau* III).

**Tableau III**

**Corrections à ajouter à la température mesurée avec un pyromètre à radiation totale, pour obtenir la température vraie**

| Température (en °K) | Pouvoir absorbant | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 500 | 385 | 245 | 175 | 130 | 95 | 70 | 45 | 30 | 15 |
| 1 000 | 780 | 495 | 350 | 255 | 190 | 135 | 95 | 55 | 25 |
| 1 500 | 1 165 | 745 | 525 | 385 | 285 | 205 | 140 | 85 | 40 |
| 2 000 | 1 550 | 990 | 700 | 515 | 380 | 260 | 185 | 115 | 55 |
| 2 500 | 1 940 | 1 240 | 880 | 645 | 475 | 340 | 230 | 145 | 65 |
| 3 000 | 2 335 | 1 385 | 1 055 | 770 | 570 | 410 | 280 | 170 | 80 |

▲ ***Tableau III : correction à ajouter à la température mesurée avec un pyromètre à radiation totale, pour obtenir la température vraie.***

* *Réalisations industrielles*

**Remarques très importantes**

Dans le cas d'une lunette pyrométrique, le rayonnement incident fait varier les propriétés de la lentille. Pour le télescope pyrométrique, ce mécanisme est moins important. En effet, le phénomène de réflexion ne dépend que de la même couche de métal réfléchissante dont les propriétés optiques sont quasi indépendantes de la température. De plus, le pouvoir réflecteur des miroirs est nettement supérieur au coefficient de transmission des lentilles et ne dépend que très peu de la longueur d'onde incidente. Les systèmes optiques à miroirs permettent la réalisation de pyromètres pour la mesure des basses températures.

Les pyromètres à radiation sont souvent utilisés dans les cas suivants : températures au-dessous du domaine d'emploi du thermocouple; atmosphère corrosive attaquant les cannes pyrométriques; corps en mouvement; corps difficilement accessibles; température moyenne de grandes surfaces; dispositif dont les caractéristiques seraient perturbées par la présence d'une canne pyrométrique. La précision obtenue dans le cas le plus favorable est de ± 1 %. Les appareils usuels ont des échelles couvrant un domaine de températures allant de 500 °C jusqu'à 2 000 °C.

Des modèles spécialement étudiés permettent de mesurer des basses températures. Ainsi, le pyromètre à miroir Siemens est prévu pour la mesure de températures allant de — 40 °C à + 20 °C, son échelle la plus large s'étendant de 100 °C à 600 °C.

***Thermo-électricité***

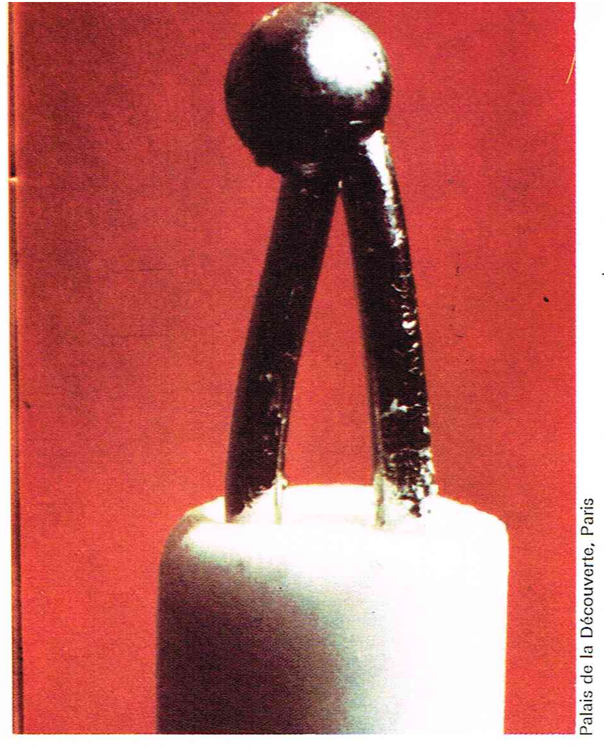
La thermo-électricité a deux applications principales : le repérage des températures grâce aux thermocouples et la réfrigération par l'utilisation des éléments Peltier. Cette dernière application repose sur l'utilisation des matériaux semi-conducteurs qui, seuls, ont un coefficient thermoélectrique suffisamment élevé pour avoir un intérêt pratique. Mais, notre propos étant les capteurs, nous ne nous intéresserons qu'à la première application, dans laquelle les métaux et les alliages jouent également un rôle très important.

La compréhension des phénomènes thermo-électriques est fortement liée à celle des métaux, en particulier de leur structure électronique et des phénomènes de diffusion liés à l'énergie des particules et à leur libre parcours moyen; cette notion intervient aussi, d'ailleurs, dans les conductivités électriques et thermiques.

**Effet Seebeck.** La thermo-électricité est la création directe de force électromotrice par des moyens thermiques : un conducteur est soumis à un gradient de température. Physiquement, le phénomène s'induit parce que les élec-

◀ ***Page ci-contre, en bas, figure 30 : comparaison de la brillance de l'image S' de la source S et de celle du filament dans le pyromètre à disparition de filament. a) cas du filament trop brillant; b) disparition du filament; c) brillance trop faible du filament.***

▶ *Extrémité d'un thermocouple montrant la soudure des deux fils et la gaine protectrice.*



Palais de la Découverte, Paris

▶ *Page ci-contre, en haut à gauche, figure 34 : variation de la force électromotrice E en fonction de la température θ pour les couples thermo-électriques. Figure 35 : pouvoir thermo-électrique Q de différents métaux (avec le plomb en référence) en fonction de la température θ.*

trons de l'extrémité chaude du conducteur peuvent trouver des états de plus faible énergie à l'extrémité froide vers laquelle ils diffusent, créant de la sorte une différence de potentiel électrique entre les deux extrémités.

En d'autres termes, on peut considérer qu'un électron a une énergie E qui, sous l'influence du gradient de température, dépend de sa position $x$ dans le métal. Une force $F_x$ agit sur cet électron :

$$F_x = \frac{\partial E}{\partial x}$$

Puisque les électrons peuvent se déplacer dans le métal, ils s'accumulent vers l'extrémité froide du conducteur ; c'est essentiellement de cette manière que la chaleur se propage. Comme cela provoque aussi l'apparition d'une différence de potentiel entre les extrémités du métal, il arrive un moment où un équilibre dynamique s'établit entre les électrons descendant le gradient thermique et l'action du champ électrique créé par l'accumulation à l'extrémité froide d'électrons qui ont déserté l'extrémité chaude. Ainsi, le nombre d'électrons passant à travers une section droite perpendiculaire, ou flux moyen, est égal dans une direction et dans l'autre. Cependant, la vitesse des électrons en provenance de l'extrémité chaude est plus élevée que celle des électrons repoussés par le champ électrique, ce qui continue d'assurer le transfert thermique.

Si nous voulons mesurer la différence de potentiel ainsi créée, il faut réaliser des connexions électriques, ce qui impose un gradient de température identique dans le circuit de détection qui crée, de la sorte, sa propre force électromotrice d'origine thermo-électrique. Si tout le circuit de détection est fait du même métal que le conducteur initial, la symétrie est complète, et on ne pourra détecter aucune force électromotrice. Ainsi donc, pour rendre possible cette détection, il sera nécessaire d'employer au moins deux métaux différents, A et B, et la f. é. m. mesurée est la différence entre les deux contributions. Cette f. é. m. $E_{AB}$ est appelée force électromotrice de Seebeck, parce qu'elle a été découverte par Johann Seebeck (1770-1851) ; c'est celle qui est mesurée habituellement aux bornes d'un thermocouple. Elle ne dépend, pour des conducteurs homogènes libres de contraintes, que de la nature des deux conducteurs A et B et de la différence de température entre les jonctions. Elle ne dépend pas de la forme des conducteurs, pourvu que leurs dimensions soient grandes devant le libre parcours moyen des porteurs de charge.

La dérivée $\frac{\Delta E_{AB}}{\Delta \theta}$ est appelée « pouvoir thermo-électrique » du couple A, B ; c'est une fonction de la température.

**Effet Peltier.** Si, au lieu de connecter les deux branches du thermocouple précédent à un appareil de mesure, on les relie, un courant d'origine thermo-électrique circulera dans la boucle. Ce courant produit un échauffement par effet Joule dans les conducteurs et cette élévation de température tend à détruire le gradient, même s'il n'y a pas de conduction thermique, à moins qu'une absorption continue d'énergie ne se produise aux jonctions à partir de réservoirs de chaleur. Examinons la situation dans une jonction AB que nous supposerons isotherme à la température θ (*fig.* 33). Le courant électrique résulte du passage des électrons de conduction dont la densité est N ; $\Delta v$ est leur vitesse de déplacement suivant $x$. Si l'on associe une énergie moyenne $\overline{E}$ à chaque électron, l'accroissement d'énergie produit par A à la jonction est, par unité d'aire :

$$\Delta Q_A = N_A \overline{E}_A \Delta v_A.$$

De la même manière, l'énergie retirée à la jonction en B est :

$$\Delta Q_B = N_B \overline{E}_B \Delta v_B.$$

L'énergie sous forme de chaleur, absorbée ou dégagée à la jonction, est alors :

$$\Delta Q = N_A \overline{E}_A \Delta v_A - N_B \overline{E}_B \Delta v_B$$

où Q est la densité de flux calorifique totale.

Les densités de courant en A et B de chaque côté de la jonction sont identiques et données par

$$I = N_A e \Delta v_A = N_B e \Delta v_B$$

où $e$ est la charge de l'électron. On en déduit :

$$Q = \frac{I}{e} (\overline{E}_A - \overline{E}_B).$$

Donc, si $\overline{E}_A$ est différente de $\overline{E}_B$, il y aura une absorption ou un dégagement de chaleur proportionnel au courant traversant la jonction et dû à l'interaction des électrons avec le réseau cristallin, alors que le dégagement de chaleur par effet Joule est proportionnel à $I^2$. Si de la chaleur est absorbée à la jonction chaude, il en sera dégagé à la jonction froide. De la même manière, le phénomène est réversible dans une jonction donnée maintenue à une température constante : la même quantité de chaleur qui était absorbée sera dégagée quand le courant sera inversé. C'est l'effet Peltier résultant ainsi de la différence des propriétés électroniques de deux métaux. L'effet Peltier est bien plus important dans les semi-conducteurs et a conduit à la fabrication d'éléments réfrigérants.

### *Pouvoir thermo-électrique*

L'expérience montre que la force électromotrice thermo-électrique pour tous les couples de métaux est correctement donnée, souvent dans de larges domaines de températures, par les deux premiers termes de son développement en série suivant $\theta = T - T_0$ :

$$E_0 = a\theta + \frac{b}{2}\theta^2.$$

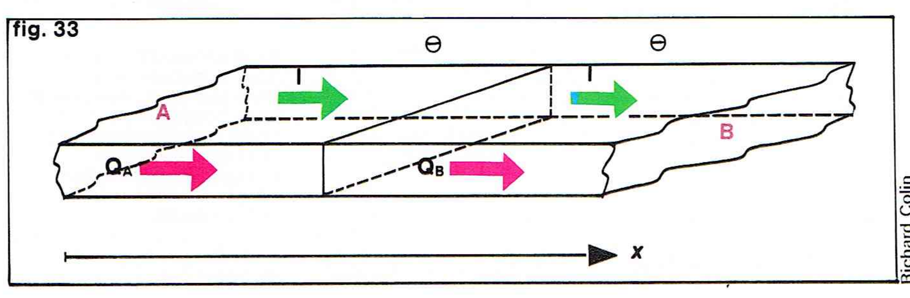
La variation de la force électromotrice en fonction de θ est ainsi représentée par une parabole verticale, dont le sommet est atteint pour $\theta = -a/b$, le maximum de force électromotrice étant $-\frac{a^2}{2b}$, et qui recoupe l'axe des abscisses pour $\theta_i = -2a/b$ : température d'inversion (*fig.* 34).

Le pouvoir thermo-électrique est déterminé par la dérivée de cette fonction :

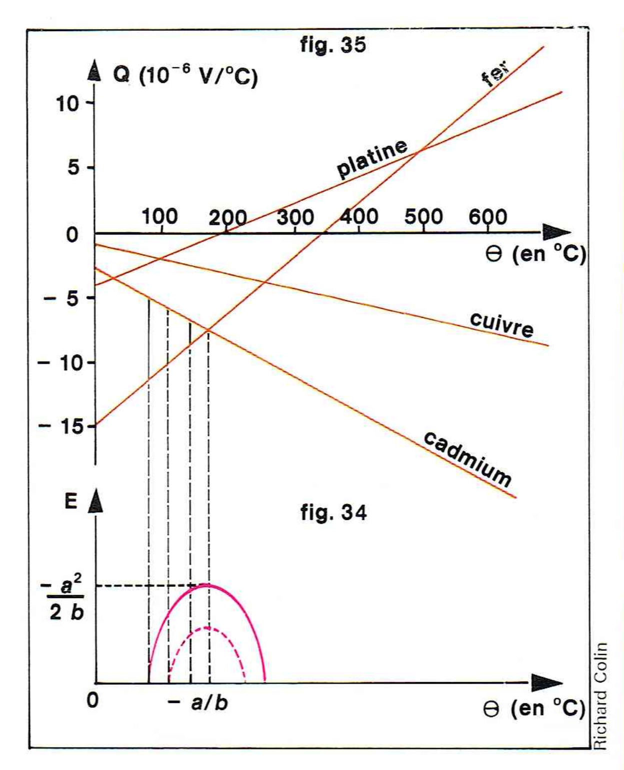
$$Q = a + b\theta \qquad \mu V/°C$$

En prenant comme métal de référence le plomb, et comme température $T_0$ celle de la glace fondante, θ est la température centésimale. On donne dans le *tableau* IV

▼ *Figure 33 : jonction de deux conducteurs A et B permettant de définir l'effet Peltier (voir développement dans le texte).*




Richard Colin




les valeurs des constantes *a* et *b* pour quelques métaux et alliages usuels. La force électromotrice que l'on peut en tirer est exprimée en microvolts et comptée positivement si le courant qui en résulte va vers le métal de référence dans la soudure froide.

Pour un certain nombre de couples usuels, ce tableau donne la force électromotrice thermo-électrique.

Cuivre-constantan

$$E\ (\mu V) = 40{,}9\ \theta + 0{,}05\ \theta^2$$

Nickel-chrome

$$E = 30{,}3\ \theta$$

La loi est quasi linéaire jusqu'à 1 200 °C.

Platine rhodié-platine

$$E = 7{,}02\ \theta + 0{,}005\ \theta^2 \text{ jusqu'à } 1\,600\ °C$$

Cuivre-fer

$$E = -13{,}84\ \theta + 0{,}021\ \theta^2$$

Chromel-alumel : le chromel (90 % Ni, 10 % Cr) et l'alumel (95 % Ni, 2 % Al, 2 % Mn, 1 % Si) ont des représentations de force électromotrice par rapport au platine qui exigent un développement à trois termes. Ensemble, par compensation, ils constituent un couple dont la tension entre 250 °C et 1 250 °C est linéaire en fonction de θ à mieux que 1 % près, suivant E = 41 θ.

La *figure* 35 est un diagramme où l'on a porté le pouvoir thermo-électrique de différents métaux avec le plomb comme référence en fonction de la température θ.

### Thermocouples usuels

Pour choisir les métaux employés pour la réalisation de thermocouples, on tient compte des facteurs suivants : la comparaison d'un fil à l'autre; l'homogénéité des fils; la fidélité; la tenue aux hautes températures; la linéarité de la force électromotrice E (T) en fonction de la température T; la sensibilité du couple $s = \frac{dE\ (T)}{dT}$ [*tableau* V].

Parmi ceux qui satisfont aux conditions énumérées ci-dessus, on trouve les quatre thermocouples suivants, utilisés dans la plupart des cas :
— fer-constantan travaillant entre — 200 °C et 600 °C;
— cuivre-constantan travaillant entre — 200 °C et 350 °C;
— chromel-alumel travaillant entre 0 °C et 1 100 °C;
— platine-platine rhodié travaillant entre 800 °C et 1 500 °C.

On choisit le couple donnant la plus grande force électromotrice pour le domaine de températures exploré. Comme le couple travaille dans l'environnement du milieu contrôlé, c'est la corrosion qui impose le type. Cependant, le souci de normalisation fait parfois choisir un thermocouple moins adapté à la mesure.

* *Préparation d'un thermocouple*

Les fils formant la jonction doivent être isolés. Pour cela, on utilise un matériau réfractaire. Les perles isolantes peuvent se présenter sous différentes formes : isolateurs cylindriques à un ou plusieurs fils; isolateurs circulaires ou méplats; perles à rotules. Les diamètres sont variables et, suivant le domaine de température, ils sont fabriqués soit en stéatite, soit en porcelaine, silice, alumine...

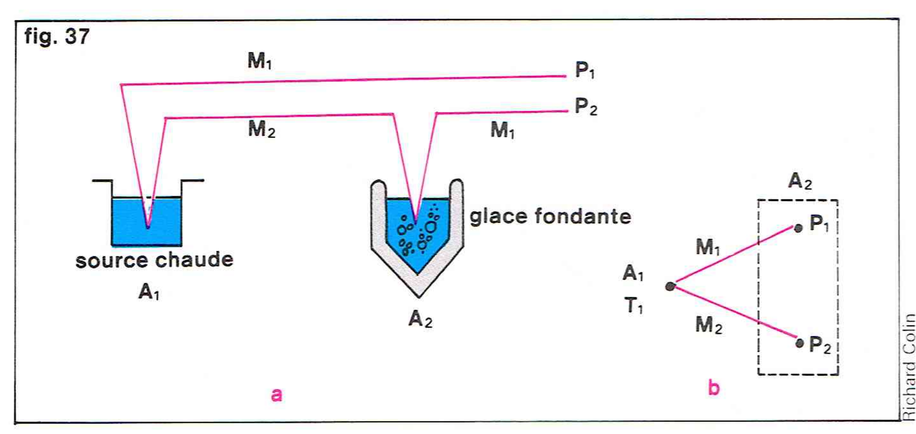
**Tableau IV**
**Valeurs des constantes *a* et *b* pour quelques métaux et alliages usuels**

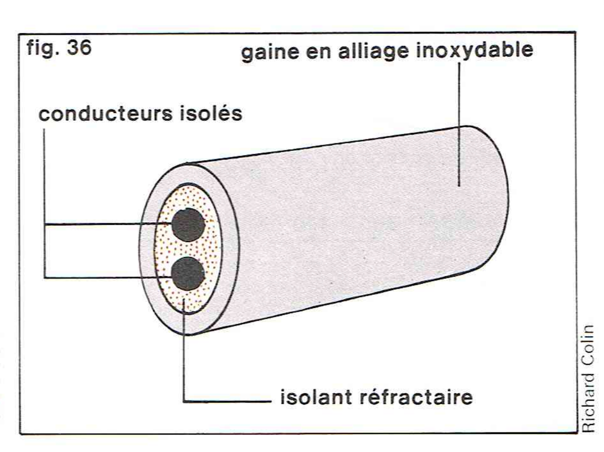
| Métaux et alliages | *a* | *b* | Domaine de validité (en °C) |
|---|---|---|---|
| Aluminium | — 0,472 | 0,003 | — 200, + 100 |
| Bismuth | — 43,7 | — 0,465 | — 200, + 100 |
| Constantan | — 38,1 | — 0,089 | 0, + 300 |
| Cuivre | 2,76 | 0,012 | 0, + 300 |
| Fer | 16,6 | — 0,030 | — 100, + 300 |
| Nickel-Chrome (85 % Ni, 15 % Cr) | 27,3 | — 0,032 | 0, + 300 |
| Platine | — 3,04 | — 0,032 | — 200, + 300 |
| Platine rhodié (90 % Pt, 10 % Rh) | 3,98 | — 0,022 | — 200, + 300 |

**Tableau V**
**Principales propriétés des thermocouples**

| Nature des couples | Composition des alliages | Pouvoir thermo-électrique en µV/°C | Pouvoir thermo-électrique valeur en mV à t °C | Domaine maximum d'utilisation (en °C) | Limite d'emploi (en °C) |
|---|---|---|---|---|---|
| Cuivre-constantan | 54 % Cu + 46 % Ni | 11 | 33,6 à 600 °C | — 250 + 600 | 350 |
| Fer-constantan | 54 % Cu + 46 % Ni | 56 | 51,9 à 900 °C | — 250 + 1 000 | 600 |
| Chromel-Alumel | 90 % Ni + 9,8 % Cr + 0,2 % Mo<br>94 % Ni + 2 % Al + 1 % Si + 2,5 % Mo | 41 | 32,4 à 800 °C | 500 1 250 | 1 100 |
| Platine rhodié-platine | 90 % Pt + 10 % Rh | 9,5 | 15,34 à 1 500 °C | 800 1 600 | 1 500 |
| Argent-constantan | 54 % Cu + 46 % Ni | 41 | 33,6 à 600 °C | 20 600 | 600 |
| Chromel-constantan | 90 % Ni + 10 % Cr<br>55 % Cu + 45 % Ni | 70 | 45 à 600 °C | 300 1 000 | 700 |
| Platine-or | | 50 | | jusqu'à 2 000 | 1 200 |
| Carbone/silicium-carbone | | 250 | 535 à 1 800 °C | jusqu'à 2 000 | 1 700 |
| Iridium rhodié-iridium | 40 % Ir + 60 % Rh | 5,4 | 10,85 à 200 °C | 500 2 000 | |
| Molybdène/fer-tungstène | 99 % Mo + 1 % Fe | 8 | 16 à 2 000 °C | 500 2 200 | |
| Carbone-tungstène | | 20 | 40 à 2 000 °C | jusqu'à 2 400 | |
| Tungstène/molybdène/fer-tungstène | 75 % W + 25 % Mo + εFe | | 6 à 3 000 °C | jusqu'à 3 000 | |

▲ ***Tableau IV : valeur des constantes thermo-électriques a et b pour quelques métaux et alliages usuels.***
***Tableau V : quelques propriétés des thermocouples (d'après M. Véron).***




▲ *A gauche, figure 37 : principe du montage d'un thermocouple : a) montage fondamental (utilisé pour les mesures de laboratoire) ; b) montage habituel (employé dans les mesures industrielles). A droite, figure 36 : coupe transversale montrant les diverses gaines assurant la protection d'un thermocouple.*

▼ *Figure 38 : schéma électrique permettant de comprendre le principe de la mesure de la température par thermocouples (voir développement dans le texte). Figure 39 : schéma électrique du montage permettant la correction automatique de la soudure froide dans le cas de la mesure de températures par thermocouples. Figure 40 : schéma du prolongement d'un thermocouple par des câbles de compensation ($M_3$ et $M_4$).*

Pour assurer la *protection* (*fig.* 36) contre les chocs, contre les atmosphères corrosives, pour assurer l'étanchéité de l'enceinte à contrôler, on place le couple dans une gaine appelée canne pyrométrique. Ces gaines doivent avoir les propriétés suivantes : bonne tenue à la température de service ; résistance aux chocs mécaniques et thermiques ; grande conductibilité thermique ; faible conductibilité électrique, surtout pour celles utilisées dans des fours à chauffage électrique ; étanchéité par rapport au milieu ambiant ; bonne tenue à la corrosion. Toutes ces qualités sont difficiles à satisfaire, la forme des cannes est très variée, la diversité des cannes pyrométriques est donc très grande.

* *Le circuit thermo-électrique*

● *Soudure froide*

$T_1$ est la température de la soudure chaude $A_1$ et $T_2$ la température de la soudure froide $A_2$.

Généralement, $A_2$ ($T_2$) se trouve être à la température ambiante, et celle-ci est susceptible de variations au cours d'une mesure. De plus, la variation de la force électromotrice n'est pas obligatoirement parfaitement linéaire. Il faudra donc avoir une température de référence ou faire une correction de soudure froide.

Le montage fondamental (mesures de laboratoire) ne nécessite pas de correction, tandis que le montage habituel (cas des mesures industrielles) en nécessite une (*fig.* 37) :

$$E_0 (T_1) = E_0 (T_2) + E_2 (T_1).$$

Il faut ajouter à la valeur lue sur l'appareil de mesure de la f. é. m., soit $E_2$ ($T_1$), la valeur $E_0$ ($T_2$) qui est la correction de soudure froide pour avoir la vraie valeur de f. é. m., $E_0$ ($T_1$) donnant la température de la source chaude $A_1$.

Sur un potentiomètre portatif, du type E. S. P. M. (MECI), cette correction se fait manuellement. Sur un appareil enregistreur, elle se fait de façon automatique.

— *Principe de la mesure* (*fig.* 38). La source S débite un courant continu constant dans le circuit comprenant la résistance R et le potentiomètre X. La résistance R permet de calibrer I en fonction de S. La méthode est une méthode d'opposition. O. S. est l'organe sensible permettant de faire le zéro. X peut être gradué soit en f. é. m., soit en température.

— *Principe de la correction automatique* (*fig.* 39). La valeur de la résistance D est fonction de la température à 0 °C. Elle a une résistance correspondant à la tension $V_0$ pour le courant I. Pour une température $T_2$, sa tension a pour valeur

$$V = V_0 + E_0 (T_2).$$

La correction n'est valable que pour un seul type de thermocouple à la fois.

● *Prolongation d'un thermocouple*

*Par câble de compensation :* dans le cas où la jonction $A_2$ n'est pas à la température ambiante, les conducteurs $M_3$ et $M_4$ doivent avoir les mêmes propriétés thermoélectriques que les fils du thermocouple qu'ils remplacent dans un domaine de températures peu élevé (100 °C, — 20 °C) [*fig.* 40]. Ces câbles sont moins onéreux que les fils du couple et peuvent avoir des sections plus élevées de façon que leur résistance électrique soit très faible. Ils sont livrés sous diverses présentations permettant une adaptation aux conditions de service. La température au niveau $A_2$ doit être homogène.

*Par fil de cuivre,* dans le cas où la température de $A_2$ est déjà la température ambiante, mais où l'appareil de mesure de f. é. m. se trouve éloigné du point de mesure.

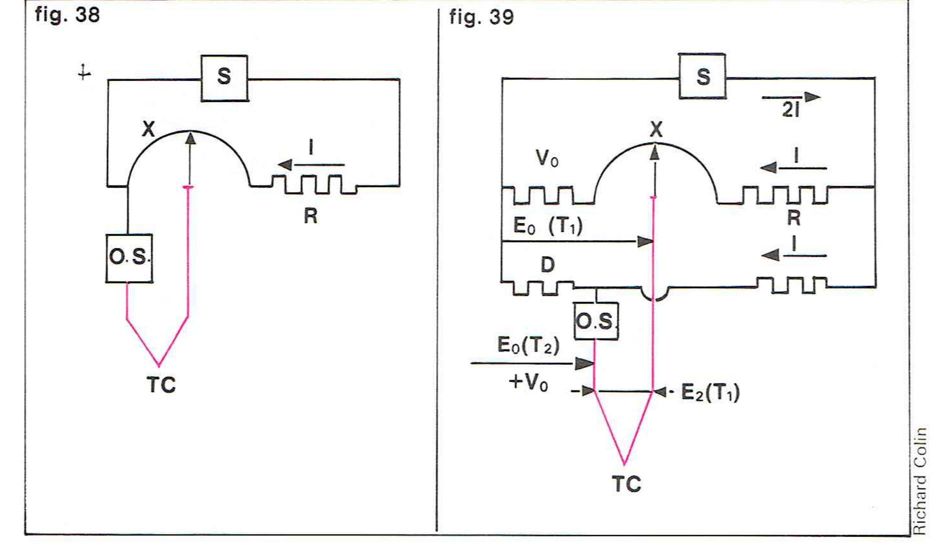
## *Piézo-électricité*

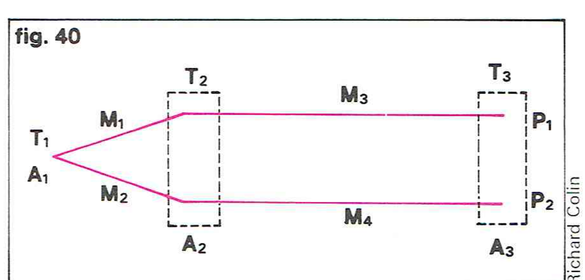
Certains cristaux (naturels ou artificiels) possèdent la propriété de faire apparaître une polarisation électrique orientée par rapport aux axes cristallins sous l'influence d'une pression ou d'une déformation mécanique convenablement dirigée.

Les corps piézo-électriques sont soit des cristaux naturels comme le quartz ou la tourmaline, artificiels comme le phosphate diammonique (ADR) ou le sel de seignette, soit des céramiques à base de titanate de baryum ($BaTiO_3$) frittées à haute température et refroidies dans un champ électrique.

La polarisation électrique du cristal peut provoquer le déplacement de charges électriques libres dans des armatures métalliques disposées perpendiculairement aux axes électriques de ces cristaux (*fig.* 41).

L'effet piézo-électrique apparaît sous sa forme la plus simple dans le quartz qui est un bioxyde de silicium ($SiO_2$). Le quartz cristallise dans le système rhomboédrique pour former une hémiédrie holoaxe. Le cristal est anisotrope et possède un axe optique dirigé suivant l'axe



des pyramides terminales du cristal. Il y a trois axes de symétrie dans une coupe transversale formant un hexagone perpendiculaire à l'axe optique. Ce sont les axes électriques.

Découpons à l'intérieur du quartz un parallélépipède rectangle dont les surfaces *a* et *b* sont perpendiculaires à l'axe électrique $E_1$. Avec une compression uniforme sur ces faces, il apparaît des charges. Dans la lame comprimée suivant son épaisseur, il y a un déplacement des ions silicium par rapport aux ions oxygène. Le moment électrique dipolaire des molécules sur la face *a* diminue et le moment électrique des molécules de la face *b* augmente. La résultante fait apparaître un champ extérieur qui n'agit que par influence.

L'expérience montre que la valeur de la charge Q est proportionnelle à la force F appliquée dans un large intervalle des valeurs de cette dernière :

$$Q = kF.$$

Le coefficient *k* est le module piézo-électrique. Pour une coupe Y du quartz, il vaut :

$$k = 2{,}32 \times 10^{-12}\ \text{C/N}.$$

En fait, pour des forces appliquées différemment, il y aura encore apparition de charges sur les faces considérées. Un module piézo-électrique est donc relatif à une direction de force appliquée et à des charges qui apparaissent sur des faces déterminées. Il s'agit donc d'un tenseur de rang 2.

Ainsi, si on écrit la polarisation résultant de l'application d'une force sur le quartz :

$$P_i = \sum_{k=1}^{6} d_{ik} F_k$$

où le tenseur *d* est tel que

$$\begin{matrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2\,d_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

C'est ainsi qu'en prenant la lame taillée précédente, on appelle « effet piézo-électrique direct longitudinal » l'effet observé. Si maintenant on applique un champ électrique entre les faces *a* et *b*, on notera une variation proportionnelle de l'épaisseur ; c'est l'effet piézo-électrique inverse. En comprimant la lame sur des faces parallèles à l'axe électrique $E_1$, les charges n'apparaissent que sur les faces *a* et *b* : c'est l'effet piézo-électrique transversal.

On conçoit donc aisément que l'effet piézo-électrique peut être mis à profit pour réaliser des transducteurs permettant de mesurer des forces, des pressions, voire des déplacements et des accélérations. Le capteur certainement le plus connu qui utilise l'effet piézo-électrique est la « cellule piézo » de nos électrophones. Bien que supplantée maintenant par des dispositifs à réluctance variable, elle a permis à quantité de mélomanes ou simplement d'amateurs de musique d'écouter leurs disques. Ce capteur de déplacement avait l'avantage de présenter une grande sensibilité et une gamme de fréquences assez étendue. Malheureusement, la réponse en fréquence souffrait de nombreux accidents, et surtout les caractéristiques mécaniques de la cellule, compliance en particulier, ne sont plus en accord avec les exigences actuelles en matière de reproduction des transitoires.

Les cristaux et les céramiques piézo-électriques sont très utilisés, aussi bien comme émetteurs que comme capteurs d'ultrasons et comme capteurs de vibrations dans une gamme de fréquences de dix kilohertz à quelques dizaines de mégahertz.

## *Jauges de contrainte. Mesure des déformations mécaniques. Jauges d'extensométrie*

Les jauges de contrainte sont d'un emploi extrêmement répandu pour mesurer des déformations, mais aussi pour atteindre par là différentes grandeurs comme une force, une pression, voire un débit ou un volume. Nous allons étudier le principe de fonctionnement des jauges électriques d'extensométrie avec leurs limites théoriques d'emploi ainsi que certains problèmes pratiques posés par leur utilisation ; nous illustrerons ainsi la difficulté qui reste à résoudre, une fois que l'on a choisi le capteur, pour l'utiliser correctement, c'est-à-dire de telle manière que rien ne vienne fausser la mesure.

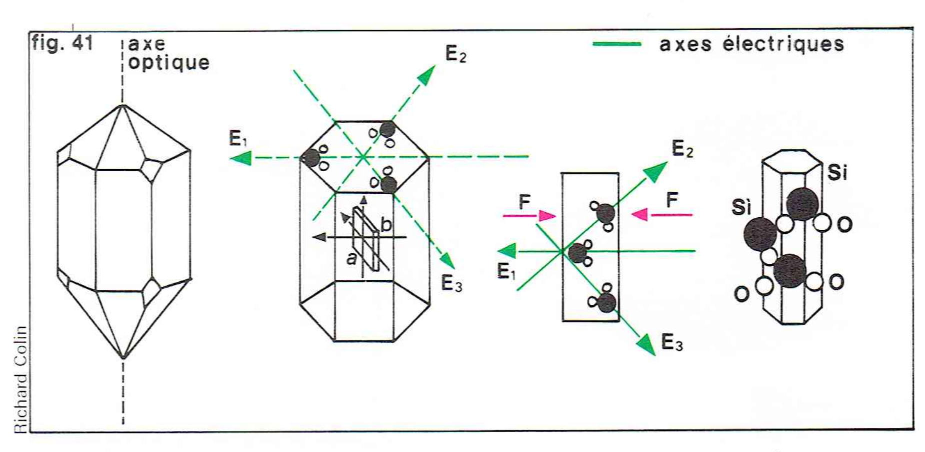
Une jauge est constituée par un fil très fin collé sur un support, feuille très mince, et disposé comme le montre la *figure* 42 ; la majeure partie de la longueur du fil se trouve dirigée suivant une direction principale, par exemple O*x*. Les contacts sont réalisés en fil conducteur de grosse section.

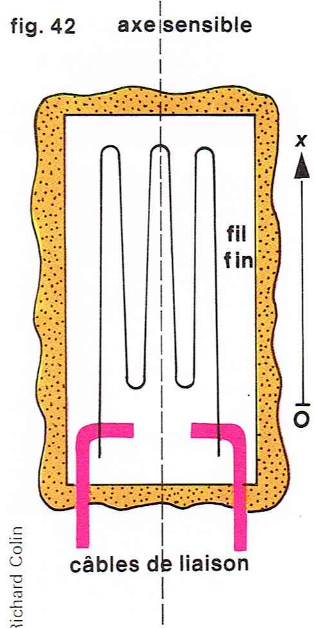
Pour déterminer l'allongement d'une structure suivant une direction donnée, on colle la jauge suivant cette direction. On mesure la variation de résistance ; celle-ci est liée à l'allongement relatif de la jauge. La connaissance des déformations sert à calculer les contraintes lorsqu'on connaît les lois qui lient ces grandeurs, en général les lois de l'élasticité.

La première application connue de la variation électrique d'un fil sous l'action d'une force est due à Bridgman, qui l'a utilisée en 1917 pour des mesures de pression hydrostatique.

Les jauges à fil résistant sont très utilisées parce qu'elles sont très pratiques : une faible déformation de la jauge entraîne en effet une variation notable de la résistance ; la méthode est fidèle ; les résistances sont légères et de faible inertie, elles permettent de suivre des déformations rapidement variables.

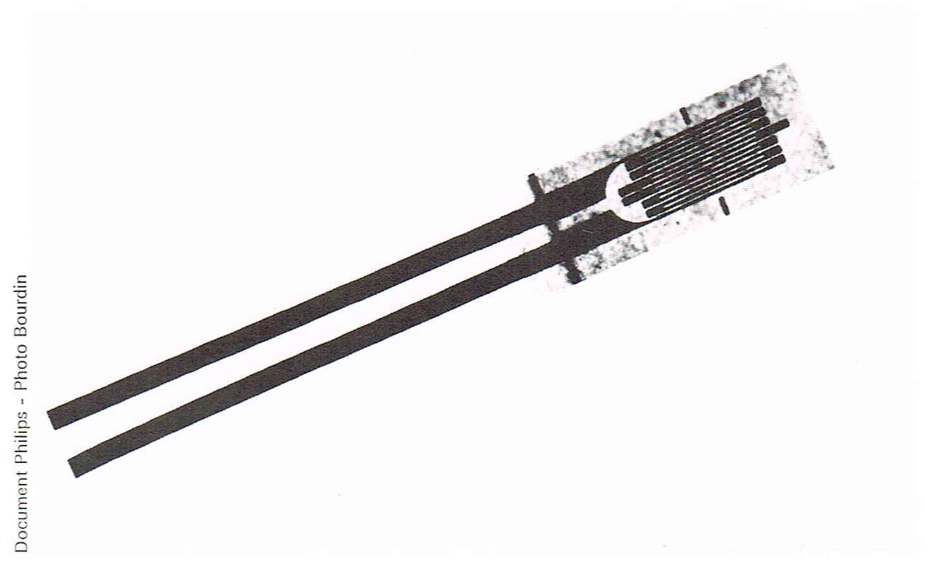
Différents procédés permettent de fabriquer les jauges (jauges à grille plane, jauges en dents de scie, jauges tissées) ; une technique développée depuis quelques années utilise les procédés des circuits imprimés. Elle permet d'obtenir les jauges dites « pelliculaires » très plates avec un support de 20 à 30 μm en résine époxy à partir d'une feuille de métal de 2 μm. Une autre technique récente utilise comme transducteur des bâtonnets de silicium monocristallin dopés. La sensibilité des jauges peut être de 50 et même 100 fois supérieure à celle des jauges métalliques. La variation de résistance peut être négative ou positive.

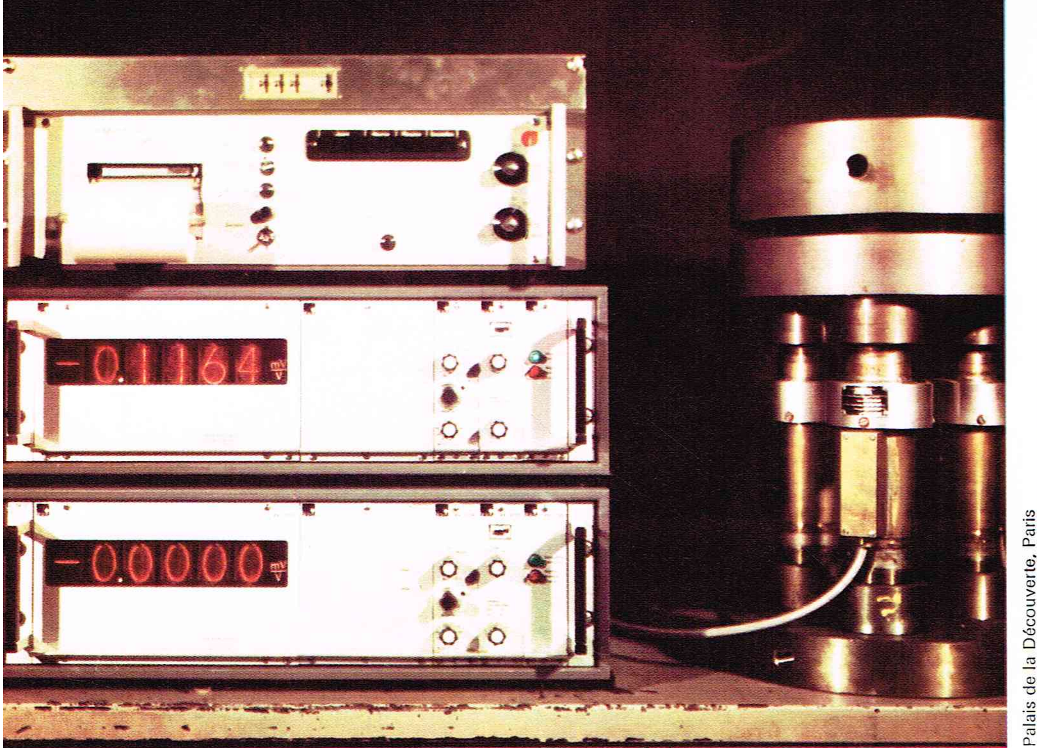


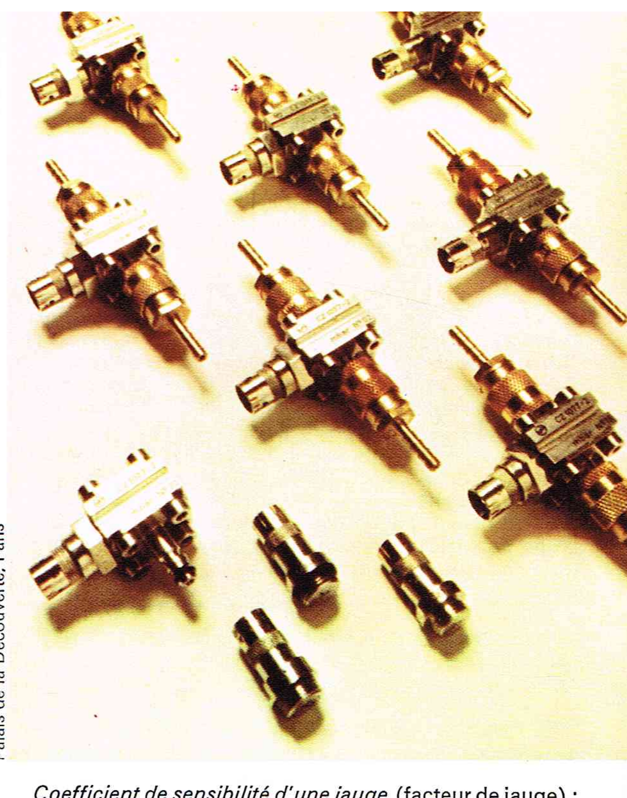

▲ ***Figure 41 : propriétés piézo-électriques d'un cristal de quartz. Figure 42 : représentation schématique d'une jauge à grille plane.***

▼ ***Une jauge linéaire à trame pelliculaire (5 mm de longueur).***






Palais de la Découverte, Paris



Palais de la Découverte, Paris

▲ *A gauche, étalonnage sur une presse de compression d'un dynamomètre de capacité 90 000 dynes. A droite, capteurs de pression à jauge diffusée.*

## *Principe physique des jauges*

### Phénomènes physiques

La plus grande partie du conducteur constituant la jauge se trouve disposée suivant une direction privilégiée O*x*. En première approximation, on peut admettre que le fil suit fidèlement les déformations que subit la surface à contrôler.

Si on considère un fil très fin soumis à une traction, dans les limites de son domaine élastique, il s'allonge, tandis que sa section diminue. Soit $\Delta l/l$ son allongement relatif, le diamètre du fil diminue de $\eta \frac{\Delta l}{l}$, $\eta$ étant le coefficient de Poisson (0,3 pour la majorité des métaux).

La résistance électrique du fil de longueur *l*, de diamètre *d* et de résistivité $\rho$ est donnée par la formule suivante :

$$R = \rho \cdot \frac{4\,l}{\pi d^2}$$

soit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2\,\frac{\Delta d}{d}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\,\eta)\,\frac{\Delta l}{l}$$

La loi de Bridgman relie les variations relatives de résistivité aux variations relatives de volume. C'est une loi de proportionnalité que nous écrivons :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C\,\frac{\Delta V}{V}$$

or

$$V = l \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

soit

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\,\Delta d}{d} = C\,(1 - 2\,\eta)\,\frac{\Delta l}{l}$$

d'où

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\,\eta) + C\,(1 - 2\,\eta)]\,\frac{\Delta l}{l}$$

On voit donc que, si l'on connaît la valeur de C et celle de $\eta$, on peut théoriquement relier la variation relative de résistance à la variation relative d'allongement.

La valeur de C est obtenue par des expériences de traction sur des fils. Cependant, dans le cas de fils laminés ou tréfilés usuellement rencontrés, qui sont constitués de cristaux ayant une orientation préférentielle, $\rho$ ne peut dépendre du seul volume, et sa variation relative doit dépendre de la direction de déformation.

### Application aux jauges

Une jauge doit être considérée comme un ensemble de brins parallèles reliés entre eux par des boucles qui sont cause d'un léger effet latéral. On a donc deux déformations, l'une suivant O*x*, l'autre suivant O*y*, que l'on appellera $\varepsilon_x$ et $\varepsilon_y$.

*Coefficient de sensibilité d'une jauge* (facteur de jauge) : la variation relative de résistance $\rho$ par rapport à l'allongement relatif définit le coefficient de sensibilité.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\,\frac{\Delta l}{l} \qquad k = \text{facteur de jauge}$$

*Coefficient de sensibilité longitudinale :*

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_x \div \varepsilon_x = k_1$$

*Coefficient de sensibilité transversale :*

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_y \div \varepsilon_y = k_2$$

Ainsi, de façon générale :

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1\varepsilon_x + k_2\varepsilon_y$$

Seule la déformation $\varepsilon_x$ est intéressante, et l'idéal est d'avoir pour $k_1$ une valeur permettant le calcul de $\varepsilon_x$ et pour $k_2$, l'effet transversal, une valeur nulle. Ainsi le but des constructeurs sera de rendre $k_2$ sinon nul, du moins aussi petit que possible.

On sait que $\varepsilon_y = -\varepsilon_x \cdot \eta$

$$\frac{\Delta R}{R} = k_1\varepsilon_x - \eta k_2\varepsilon_x = (k_1 - \eta k_2)\,\varepsilon_x$$

Ce qu'il est intéressant de connaître, c'est :

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon_x \qquad k = \text{facteur de jauge}$$

donc

$$k = k_1 - \eta k_2$$

$$k = k_1\left(1 - \eta\,\frac{k_2}{k_1}\right)$$

En général, le rapport de la sensibilité transversale à la sensibilité longitudinale est de l'ordre de 2,5 %, et l'on trouve que le coefficient de sensibilité réel, *k*, de la jauge est de 0,7 % plus petit que le coefficient théorique.

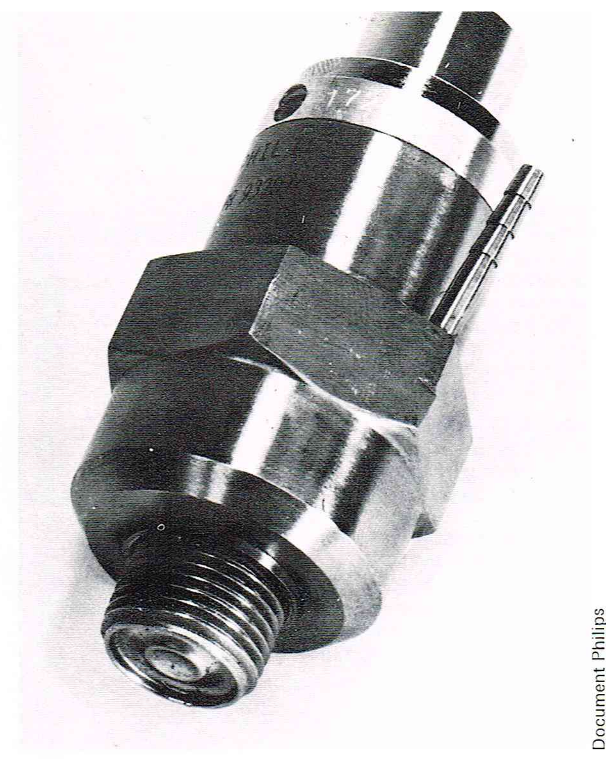
### Conclusion de cette approche théorique

Le facteur de jauge est impossible à calculer avec une bonne précision, puisque la constante C repose sur des hypothèses plus ou moins justifiées et que le rapport $k_2/k_1$ ne peut qu'être approché, c'est-à-dire évalué.

La valeur du facteur de jauge ne peut donc être obtenue que par étalonnage, et cela pour chaque jauge. En réalité, une jauge collée est irrécupérable, et il faut donc faire un étalonnage statistique. On prélèvera généralement sur les lots fabriqués avec le même fil 10 à 15 % de la production journalière, et on déterminera leur coefficient de sensibilité.

* *Propriétés des métaux constitutifs des jauges*

- Le facteur de jauge doit être élevé pour rendre la mesure aisée.
- La résistivité doit être grande. En effet, on mesure $\Delta R/R$, et plus $\rho$ est élevée, plus R est grande et plus $\Delta R$ qui est proportionnelle à R est grande.



◀ ***Un capteur de pression à jauge de contrainte; cet appareil peut contrôler en continu des pressions dans des liquides atteignant 200 °C et dans des gaz atteignant 2 800 °C (pendant 10 s).***

Document Philips

- Le facteur de jauge doit être stable dans un domaine de température suffisant.
- La variation de résistance ne doit dépendre que de la déformation (les variations de température ne doivent pas intervenir).
- La déformation ne doit pas provoquer d'effet électrique autre que la variation de résistance ohmique (thermo-électricité par exemple).
- Le métal doit avoir un grand domaine où il garde ses propriétés élastiques.
- La mise en œuvre doit être aisée.

Les propriétés des métaux constituant les jauges sont récapitulées dans le *tableau* VI.

* *Effets thermiques sur la jauge*

*Effets primaires*. Lorsqu'une jauge collée sur une structure est soumise à une variation de température, on constate :

— un allongement de la grille

$$\Delta l/l = \alpha \Delta t$$

— un allongement du matériau support de grille

$$\Delta l/l = \gamma \Delta t$$

— une variation de résistance

$$\Delta R/R = \beta \Delta t.$$

La résultante de ces trois effets est de la forme :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta t} = (\alpha - \gamma)\, k \Delta t + \beta \Delta t.$$

Pour éliminer ces variations de résistances, on essaie par « autocompensation » d'annuler le terme

$$k\,(\alpha - \gamma) + \beta.$$

C'est un problème propre à chacune des jauges. Le constructeur doit donner le domaine d'autocompensation de la jauge. Il s'arrange pour que le terme $k\alpha + \beta$ soit égal et opposé à $k\gamma$ sur un certain domaine de température en dopant en impuretés, par exemple, le métal constitutif de la jauge. Lorsque les jauges sont utilisées hors de ce domaine, il peut en résulter des transformations métallurgiques irréversibles détruisant le capteur, tout en entraînant une modification des coefficients $\alpha$ et $\beta$, et détruisant l'autocompensation.

Il est possible aussi d'éliminer ces effets par des compensations extérieures au capteur (voir plus loin).

*Effets secondaires*. Il peut apparaître une f. é. m. au contact entre la jauge et les fils de liaison. Le module d'Young des matériaux formant le support (semelle) de la jauge varie parfois de façon importante avec la température.

* *Mesure du facteur de jauge k*

On ne fera que la remarque suivante : dans les conditions actuelles de production des jauges par des procédés mécaniques, tous les prélèvements d'un même lot donnent des facteurs $k$ connus à mieux que 0,2 %, ce qui permet de garantir statistiquement $k$ à 0,5 %.

### *Emploi des jauges de déformation*

**Principe**

On considère un pont de Wheatstone (*fig.* 43) constitué de quatre résistances $R_1$, $R_2$, $R_3$ et $R_4$, une source de tension continue et un galvanomètre.

$$V_p - V_q = V_B - V_D = E\left|\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_3}\right|$$

$$Z_{pq} = g + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_4 R_2}{R_2 + R_4}$$

Le courant $i$ traversant le galvanomètre est de la forme :

$$i = E\,\frac{R_3(R_2 + R_4) - R_4(R_1 + R_3)}{g\,(R_1 + R_2)\,(R_2 + R_4) + R_1R_3\,(R_2 + R_4) + R_2R_4\,(R_1 + R_3)}$$

* *Première méthode*

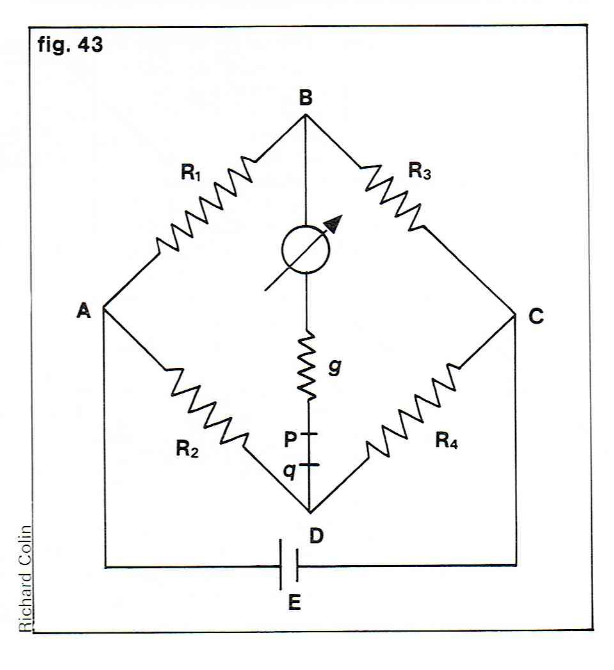
$R_3 = R_4 = R$
$R_1 = X = R + \Delta R$
$R_2 =$ résistance variable étalonnée.

La méthode est une méthode de zéro, c'est-à-dire que l'on ajuste $R_2$ jusqu'à ce que le courant soit nul dans le galvanomètre.

▼ ***Tableau VI : propriétés des alliages constituant les jauges.***

**Tableau VI**
**Propriétés des alliages constitutifs des jauges**

| Alliages | Nom usuel et composition | Type de jauge | Facteur de jauge | Résistivité (en Ω/cm) | $\frac{\Delta\Omega}{\Omega}/°C = \beta$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Cupro-nickel | Advance Constantan (57 % Cu, 43 % Ni) | Séries 100 | 2 | $49 \cdot 10^{-6}$ | $20 \cdot 10^{-6}$ |
| Nickel-chrome-fer | Isoélastic (36 % Ni, 8 % Cr 0,5 % Mo, Fe) | Séries 300 | 3,5 (domaine élastique) | $115 \cdot 10^{-6}$ | |
| Nickel-chrome | Nichrome V 80 % Ni, 20 % Cr | Séries 400 Séries 600 | 2 | $108 \cdot 10^{-6}$ | |
| Nickel-chrome-aluminium | Karma 4 ($Ni_3Cr$) $Ni_3Al$ | Séries 500 | 2 | $128 \cdot 10^{-6}$ | $135 \cdot 10^{-6}$ |
| Nickel pur | | Sondes de température | de — 2 à — 12,1 | $12 \cdot 10^{-6}$ | |




Richard Colin

◀ ***Figure 43 : schéma de principe du pont de Wheatstone.***

▶ *Figure 44 : montage demi-pont ; l'introduction d'une jauge passive* (JP) *au voisinage de la jauge active* (JA) *permet la compensation des effets parasites d'origine thermique.*

fig. 44

▶ *Page ci-contre, figure 47 : principe de différents types de capteurs à jauges ; a) capteur de traction ; b) capteur de compression ; c) capteur de torsion ; d) capteurs de pression. Aspect extérieur et coupe longitudinale de : e) un capteur de pression ; f) un capteur de force à jauge (capteurs Sexta) ; d'après Uri Zelbstein,* Mesures électroniques, *Dunod, Paris, 1969.*

$$R\,(R_2 + R) = R\,(R + \Delta R + R)$$

$$R_2 = R + \Delta R$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_2 - R}{R}$$

C'est une méthode précise, mais qui ne permet pas l'enregistrement.

* *Deuxième méthode*

On pose $R_2 = R_3 = R_4 = R$

$$R_1 = X = R + \Delta R$$

$$i = \frac{E}{4\,(R + g) + Z\Delta R\,(1 + g/R)} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

$g/R$ doit être petit ; ainsi, le terme $Z\Delta R\,(1 + g/R)$ est négligeable devant $4\,(R + g)$ :

$$i = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{R + g}$$

$g$ et R sont fixées ; seule $\Delta R$ varie. Le courant $i$ est donc directement proportionnel à la variation relative de résistance $\Delta R/R$. Cette méthode permet l'enregistrement d'un courant.

### Compensation des effets parasites d'origine thermique

*Utilisation d'une jauge passive — demi-pont :* dans le montage en pont classique de Wheatstone, on introduit une deuxième jauge, qui sera installée au voisinage de la jauge active (c'est-à-dire de mesure de déformation) et sera donc à la même température que celle-ci. Elle doit donc normalement annuler tous les effets thermiques. Ce procédé a longtemps été le seul utilisé (*fig.* 44).

*Utilisation d'une jauge autocompensée :* l'existence de jauges autocompensées permet d'utiliser des montages avec une seule jauge active, mais n'empêche pas qu'il soit nécessaire d'éliminer les effets thermiques sur les fils de liaison. La méthode consiste à prendre des jauges à trois fils pour avoir la même longueur de câble dans les branches adjacentes du pont ($l_1 = l_2$) [*fig.* 45].

### Propriétés des jauges de contrainte

Que la jauge soit collée sur une structure conductrice (métal) ou sur une structure non conductrice (plastique), la résistance d'isolement se traduit par une résistance en parallèle avec la jauge (*fig.* 46).

La résistance de la branche AB a pour valeur :

$$Z = \frac{R_i}{R_i + J}$$

avec Z = valeur apparente de la résistance de jauge, J = valeur réelle de la résistance de jauge, $R_i$ = résistance d'isolement.

Le pont de mesure donne la variation $\Delta Z/Z$, qui a deux origines : la variation $\Delta J$ et la variation $\Delta R_i$. Cette dernière peut être due soit à une mauvaise polymérisation de la colle, soit à la température, soit à l'effet de l'humidité. Ainsi, on peut se poser deux problèmes : quelle doit être la valeur de $R_i$ pour que la mesure $\Delta J/J$ soit correcte à $R_i$ constante ? quelle est l'influence de la variation de $R_i$ sur la mesure $\Delta J/J$ à J constant ?

- $R_i$ *est constant :*

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta J}{J}\,\frac{R_i}{R_i + J} = \frac{\Delta J}{J} \cdot \frac{1}{1 + J/R_i}$$

Dans l'hypothèse où $R_i \gg J$

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta J}{J} \cdot \left(1 - \frac{J}{R_i}\right)$$

Si on veut une précision de $10^{-4}$ sur $\Delta J/J$, il faut que $J/R_i = 10^{-4}$. Pour $J = 120\ \Omega \rightarrow R_i = 1{,}2\ M\Omega$.

- $R_i$ *varie :* on peut supposer que $R_i$ varie de $R_i$ à $aR_i$ avec $a$ compris entre 0 et 1.

$$Z = \frac{R_i J}{R_i + J} \qquad Z' = \frac{aR_i J}{aR_i + J}$$

$$\frac{Z - Z'}{Z} = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{1 - a}{1 + aR_i/J}$$

Cette dernière relation permet donc de calculer l'influence de la variation de $R_i$.

Pour avoir une bonne mesure, il faut que $R_i$ soit de l'ordre de 1 000 MΩ.

Il faut dire aussi que la résistance d'isolement est un critère de qualité de collage. En effet, c'est une coïncidence heureuse pour l'expérimentateur que la résistance d'isolement soit en corrélation avec l'état de polymérisation de la colle (époxy en particulier).

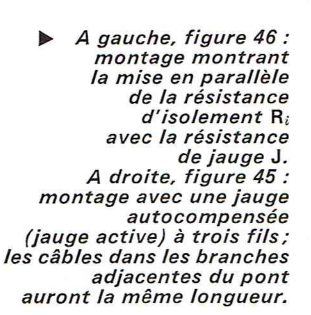
### Réalisation de quelques capteurs

Voir les différents types représentés sur la *figure* 47.

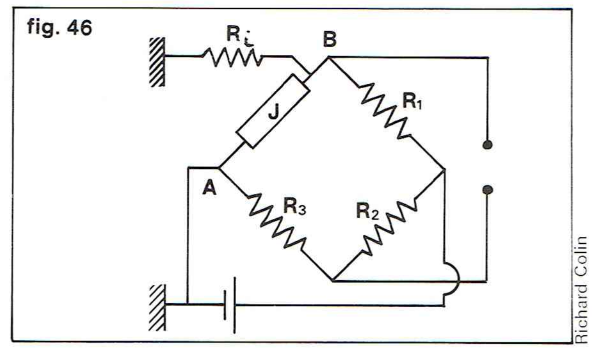
## *Contrôle de la matière. Capteurs chimiques*

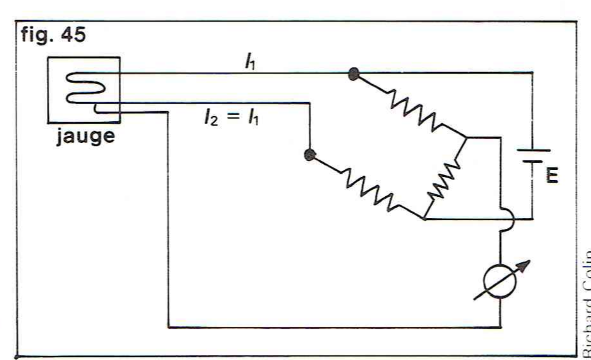
Un certain nombre d'activités industrielles sont consacrées à la préparation et à l'élaboration de matériaux ou de corps plus ou moins complexes ; c'est le cas de beaucoup d'industries chimiques et des industries métallurgiques notamment. Les procédés d'élaboration nécessitent un contrôle de la matière qui revêt trois aspects : le contrôle dimensionnel, le contrôle physique, le contrôle chimique.

Le contrôle dimensionnel s'attache aux mesures de longueur, de volume, pour lesquelles on emploie des capteurs dont on a déjà parlé. Les contrôles physique et chimique sont souvent très intimement liés, et l'on utilise fréquemment des méthodes physiques pour faire une



▶ *A gauche, figure 46 : montage montrant la mise en parallèle de la résistance d'isolement* $R_i$ *avec la résistance de jauge J. A droite, figure 45 : montage avec une jauge autocompensée (jauge active) à trois fils ; les câbles dans les branches adjacentes du pont auront la même longueur.*



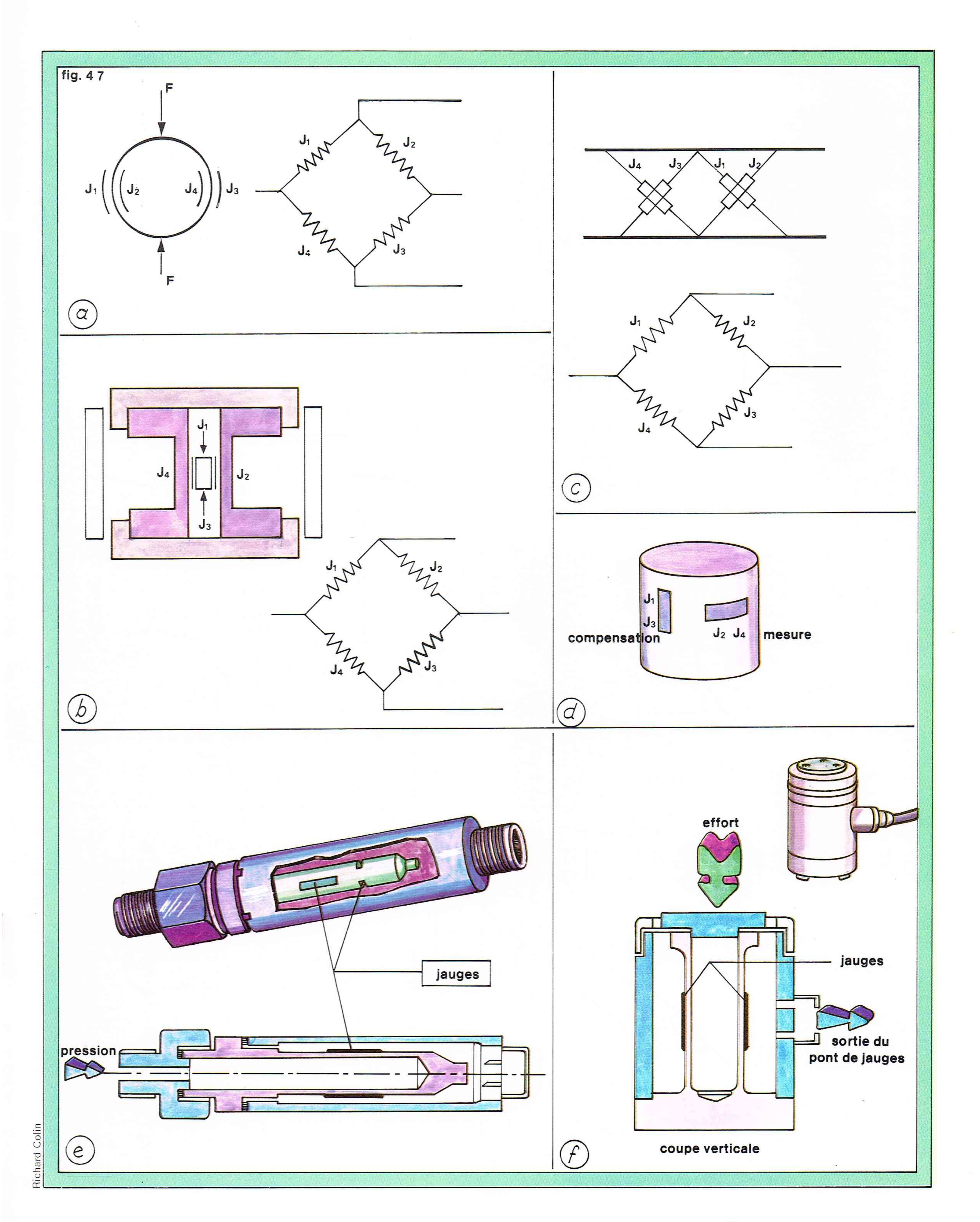

fig. 4 7
F
J1
J2
J4
J3
F
J1
J2
J4
J3
a
J4
J3
J1
J2
J1
J2
J4
J3
c
J1
J4
J2
J3
J1
J2
J4
J3
b
J1
J3
compensation
J2 J4
mesure
d
jauges
pression
e
effort
jauges
sortie du
pont de jauges
coupe verticale
f
Richard Colin

**Tableau VII**
**Méthodes physiques d'analyse chimique**

| Classes | Phénomènes mis en jeu | Techniques | Utilisations les plus courantes |
|---|---|---|---|
| **Optique** | Indice de réfraction | Réfractométrie | Dosage de composés organiques (huiles) |
| | Pouvoir rotatoire | Polarimétrie | Dosage de composés organiques (sucre) |
| | Forme et comptage des cristaux | Microscopie | Dosage des espèces chimiques par dénombrement des cristaux de même forme |
| | Différence des indices de réfraction des métaux | Microscopie polarisante | Minéraux doués de biréfringence |
| | Diffusion de la lumière | | Dosage des milieux troubles |
| | Fluorescence | Fluorescencimétrie | |
| | Phosphorescence | Phosphorométrie | |
| | Émission des photons optiques | Spectrométrie d'absorption dans le visible et l'ultraviolet | Dosage des éléments |
| **Rayonnement** | Absorption des photons optiques | Spectrométrie d'absorption dans le visible et l'ultraviolet | Dosage des éléments et des molécules organiques |
| | | Spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge | Dosage des molécules organiques<br>Étude des structures moléculaires |
| | Absorption et réémission des photons optiques | Spectrométrie par effet Raman | Étude des structures moléculaires |
| | Rayonnement d'émission X | Spectrométrie X et spectrométrie par fluorescence X | Dosage des éléments (de nombre atomique supérieur à celui du magnésium |
| | Rayonnement corpusculaire et $\gamma$<br>Résonance magnétique nucléaire | Spectrométrie $\gamma$ | Dosage des éléments<br>Dosage des espèces chimique et recherche des structures |
| **Méthodes électriques**<br>— Le phénomène mis en jeu est une réaction chimique provoquée par le courant électrique qui modifie le caractère physique de la solution | Vitesse de diffusion et potentiel de dépôt sur électrode | Polarographie | Dosage des ions et des molécules |
| | Quantité d'électricité | Coulométrie | |
| — Il n'y a pas de réaction chimique apportée par le courant. Le phénomène utilisé sert à repérer un état chimique de la solution | Potentiel des électrodes | Potentiométrie | |
| | Intensité de courant de saturation | Ampérométrie | |
| | Résistivité de la solution | Conductométrie | |
| — Autre méthode | Vitesse de transport des ions dans un champ électrique | Électrophorèse | Dosage des ions |
| **Méthodes magnétiques et électromagnétiques** | | Spectrographie de masse | Dosage des molécules et des éléments |
| **Autres méthodes** | Adsorption | Chromatographie sur support de partage, en phase gazeuse et thermochromatographie | Séparation et dosage de molécules notamment de molécules organiques |
| | Tension superficielle | Tensiométrie | Dosage de quelques espèces chimiques (ex. alcool camphré) |
| | Gravimétrie contrôlée | Thermogravimétrie | Dosage de composés minéraux |
| | Marquage des éléments | Méthodes isotopiques | Dosage des éléments |

analyse chimique (*tableau* VII), de même que les physicochimistes interviennent aussi fréquemment pour faire des déterminations de paramètres physiques.

Après avoir donné un tableau condensant les méthodes physiques utilisées pour faire une analyse chimique de la matière, nous détaillerons un capteur essentiel des mesures chimiques : le pH-mètre.

## *pH-métrie*

### Réaction acide-base

On peut adopter la définition de Brönsted qui s'applique aisément aux réactions acide-base dans un grand nombre de solvants. Les acides sont des corps susceptibles de céder des protons ; inversement, les bases ont la propriété de fixer les protons.

$$\text{Acide} \rightleftharpoons \text{Base} + H^+.$$

On peut définir un acide comme une substance qui se dissocie en solution aqueuse en formant des ions hydrogène, tandis qu'une base contient des ions hydroxyde $OH^-$ ou des groupes hydroxyle —OH qui, en solution aqueuse, fournissent les ions hydroxyde.

### Concentration en ions hydrogène. Définition du pH

L'eau pure possède une certaine conductivité, très faible mais mesurable, égale environ au dix-millionième d'une solution normale d'acide ou de base. Cela fait supposer que l'ionisation de l'eau

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$$

produit des ions hydrogène et des ions hydroxyde à la concentration $10^{-7}$ N.

Les déterminations précises de conductibilité électrique de l'eau et des solutions diluées d'acide chlorhydrique, de soude et de chlorure de sodium, ont donné la valeur $1{,}00 \cdot 10^{-7}$ pour $(H^+)$ et $(OH^-)$ dans l'eau pure à 25 °C. En effet, l'importance de l'ionisation dépend de la température : à 0 °C, les concentrations $(H^+)$ et $(OH^-)$ sont $0{,}83 \cdot 10^{-7}$ et, à 100 °C, $6{,}9 \cdot 10^{-7}$.

Ainsi, au lieu de dire que la concentration de l'ion hydrogène dans l'eau est $1 \cdot 10^{-7}$, on a coutume de dire que le pH de l'eau pure est de 7. Le pH est le logarithme décimal, changé de signe, de la concentration en ions hydrogène.

$$pH = -\log_{10} (H^+).$$

*Exemples :*

- pH d'une solution où la concentration $(H^+)$ est de $2 \cdot 10^{-5}$

$$\log 2 \cdot 10^{-5} = 0{,}301 - 5 = -4{,}699$$
$$pH = 4{,}699$$

- Concentration en ions hydrogène d'une solution dont le pH est nul :

$$(H^+) = \text{antilog } 0 = 1$$

Donc une solution normale en ion $(H^+)$ a un pH nul.

### Eau et solution diluées

Puisque l'ionisation de l'eau dans les solutions aqueuses diluées est à peu près la même que celle de l'eau pure, et qu'elle peut donc être considérée comme sensiblement constante à température constante, on a l'habitude de ne pas faire figurer l'activité de l'eau dans l'expression de la loi d'action de masse pour les solutions aqueuses diluées.

Une réaction importante est celle de neutralisation :

$$H^+ + OH^- \rightarrow H_2O_{(\text{liquide})}$$

et la réaction d'ionisation de l'eau

$$H_2O_{(\text{liquide})} \rightarrow H^+ + OH^-.$$

La constante d'équilibre de cette dernière réaction est :

$$\frac{(H^+)\ (OH^-)}{(H_2O)} = k_1$$

$(H_2O)$ représente l'activité de l'eau dans la solution. Le produit $k_1\ (H_2O)$ peut être considéré comme constant à température constante ; on le posera égal à $k$.

Soit $$(H^+)\ (OH^-) = k.$$

La valeur de $k$ est de $1{,}0 \cdot 10^{-14}$ mole²/litre² à 25 °C. Donc, dans l'eau pure, les ions $H^+$ et les ions $OH^-$ sont les uns et les autres à la concentration de $10^{-7}$ mole par litre, et dans les solutions acides ou basiques, le produit des concentrations de ces deux ions est égal à $10^{-14}$.

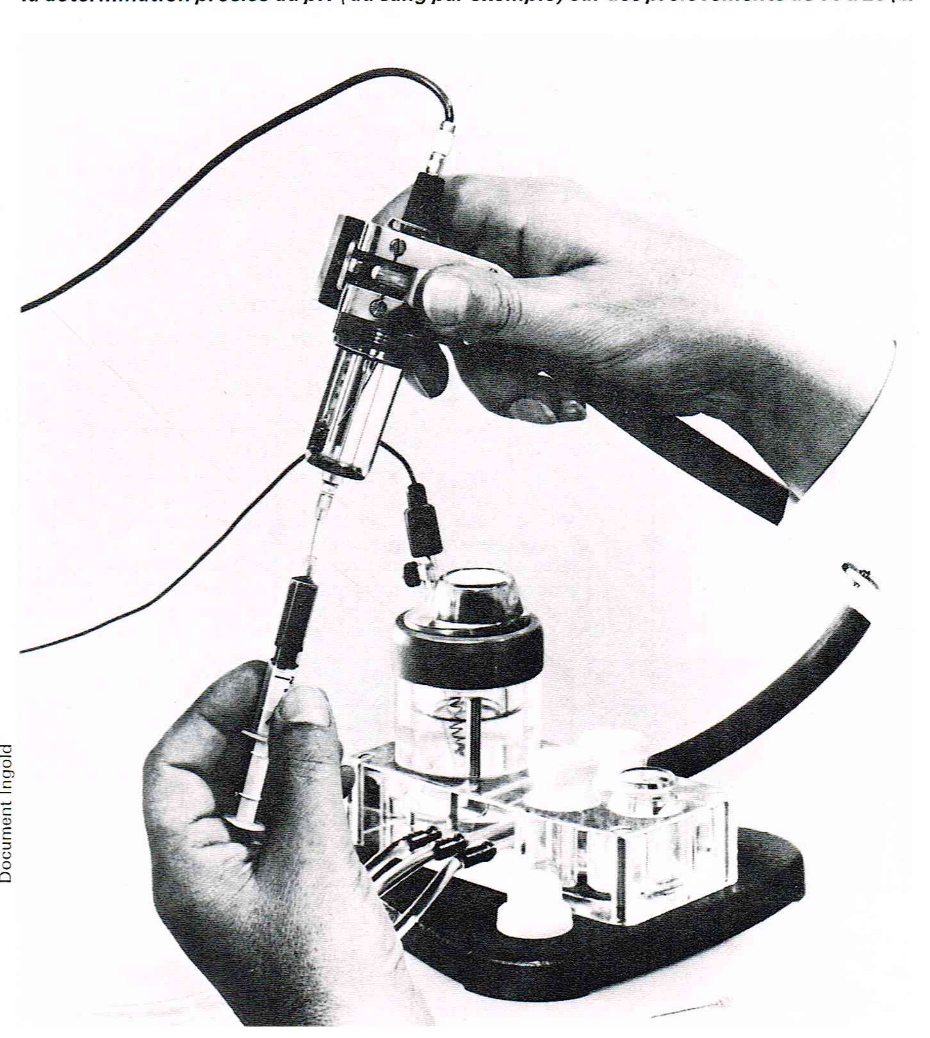


Document Ingold

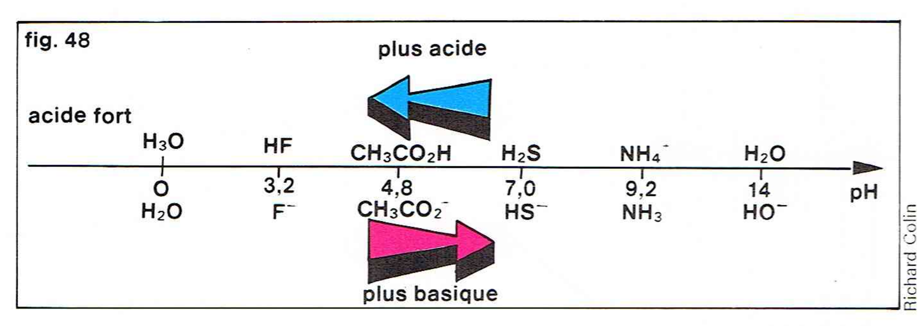
▲ ***Ensemble de sept électrodes combinées, respectivement de gauche à droite : à membrane cylindrique très robuste et tête enfichable, utilisée dans l'industrie (405 K 7) ; à membrane sphérique, à rodage normalisé et tête métallique (K 19), à membrane de pénétration du type aiguille pour mesurer dans les tissus animaux ou végétaux ou les milieux très consistants (406 M 3) ; à membrane protégée, à monture renforcée en matière plastique, destinée aux mesures itinérantes (455) ; avec tubulure latérale pour alimentation en charge par un réservoir KCl extérieur, à usage industriel (425) ; pour sondes industrielles, stérilisable à la vapeur, à tête enfichable (465-35 K 9) ; pour sondes industrielles pressurisables jusqu'à 25 bars (465).***

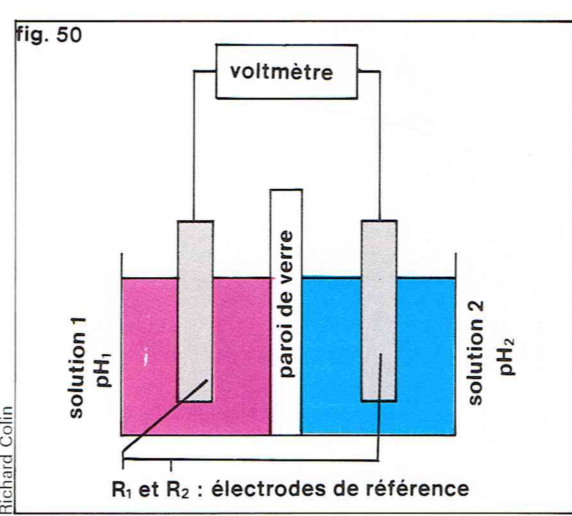
◄ ***Page ci-contre, tableau VII : méthodes physiques utilisées pour l'analyse chimique.***

▼ ***Chaîne de mesure microcapillaire blindée dont tous les éléments peuvent être maintenus à température constante ; cet appareil permet la détermination précise du pH (du sang par exemple) sur des prélèvements de 10 à 20 µl.***



Document Ingold




▲▶ *Figure 48 : échelle des acidités.* *Figure 50 : mesure du pH avec une électrode de verre.*

Ceci va nous permettre de définir une échelle d'acidité. En effet, en utilisant l'expression d'équilibre précédente

$$(OH^-)\ (H^+) = k = 1{,}00 \cdot 10^{-14} \text{ à } 25\ °C,$$

on peut aussi calculer la concentration en ions hydroxyde pour une solution de pH donné. Ainsi, dans une solution de pH 14, on a

$$(H^+) = 10^{-14} \qquad \text{d'où } (OH^-) = 1.$$

Les solutions acides ont un pH inférieur à 7 et les solutions alcalines un pH supérieur à 7.

Pour comparer la force des différents acides, il suffit de les faire réagir sur une même base ; plus un acide est fort, plus il aura tendance à céder ses protons. Si le solvant est lui-même susceptible de fixer des protons $H^+$, il est commode de le choisir comme base de référence. Ainsi, lorsque l'on met de l'acide dans de l'eau, on observe l'équilibre suivant :

$$\text{Acide} + H_2O \rightleftharpoons \text{Base} + H_3O^+$$

par exemple :

$$HF + H_2O \rightleftharpoons F^- + H_3O^+$$

On applique la loi d'action de masse :

$$\frac{(\text{Base})\ (H_3O^+)}{(\text{Acide})\ (H_2O)} = k$$

La concentration en eau restant très élevée, on la considérera comme constante en solution diluée :

$$\frac{(\text{Base})\ (H_3O^+)}{(\text{Acide})} = k_A$$

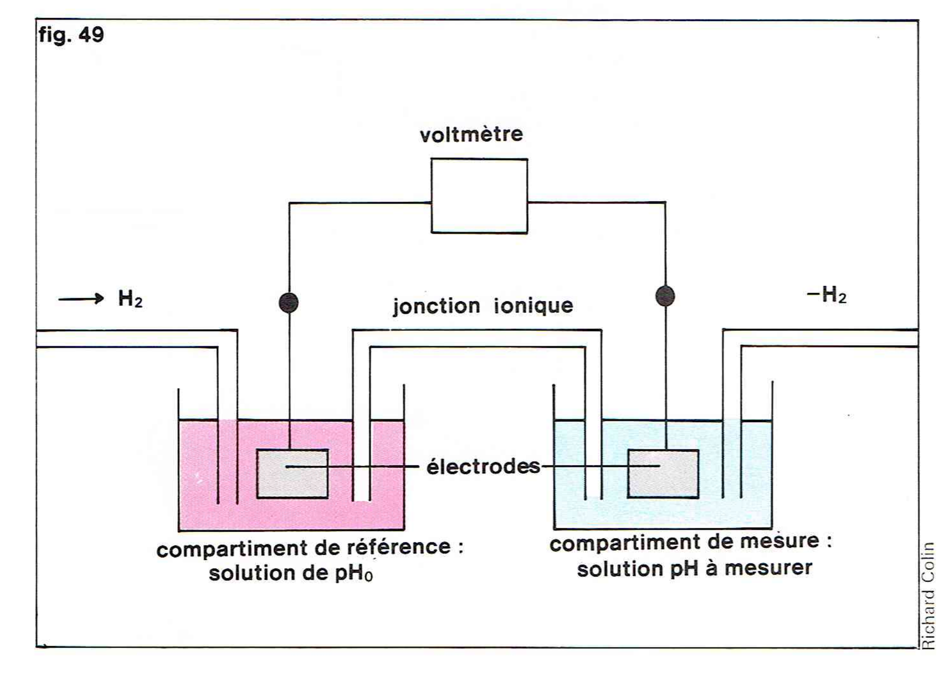
$k_A$ est la constante d'acidité.

On prendra, comme pour le pH $pk_A = -\log_{10} k_A$

$$pH = pk_A + \log_{10} \frac{(\text{Base})}{(\text{Acide})}$$

Le $pk_A$ est égal au pH d'une solution contenant un mélange d'acide et de la base du même couple à la même concentration (*fig.* 48).

▼ *Figure 49 : mesure absolue du pH avec une électrode à hydrogène.*




Richard Colin

**Remarques.** Il existe des solvants autres que l'eau. L'intérêt qu'ils présentent est considérable ; ils permettent de faire des réactions acide-base impossibles à réaliser dans l'eau. Un acide fort dans l'eau peut devenir faible dans un solvant convenablement choisi, et inversement.

## Mesure du pH

* *Électrode à hydrogène*

C'est le système oxydoréducteur $H^+/H_2$ qui permet de faire une liaison entre les mesures de pH et les mesures de potentiel.

A la réaction $2\ H^+ + 2\ e^- \rightleftharpoons H_2$, on fait correspondre le potentiel d'équilibre défini par la loi de Nernst :

$$E = E^x{}_0 + \frac{RT}{2\ F} \text{Log}_e \frac{(H^+)^2}{(H_2)}$$

R = constante des gaz parfaits
T = température absolue
F = constante de Faraday (96 500 C)

En solution saturée d'hydrogène sous la pression atmosphérique, $(H_2)$ est une constante ; à 20 °C, cette relation devient :

$$E = E_0 + 0{,}029 \log_{10} (H^+)^2$$

avec $E_0$ = potentiel normal du système.

Par définition de l'origine des potentiels, on a $E_0 = 0{,}00$ V,

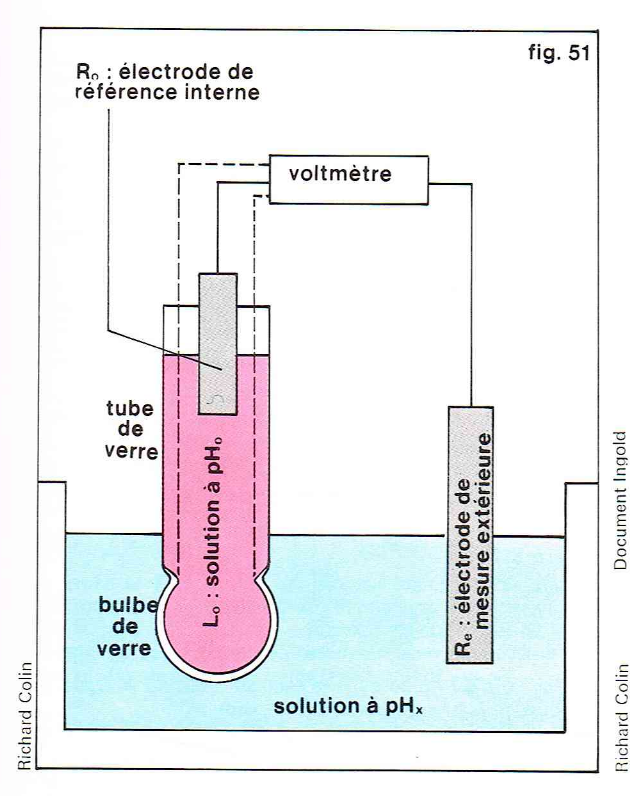
donc $$E = -0{,}058 \text{ pH}.$$

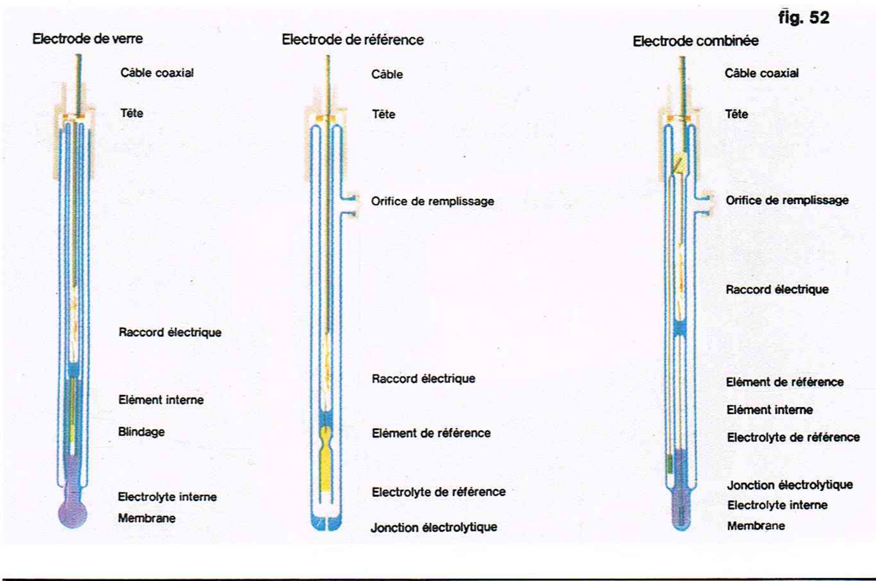
La mesure du potentiel d'une électrode à hydrogène permet donc une détermination absolue du pH (*fig.* 49). Cependant, la mise en œuvre de cette méthode présente trois difficultés : l'électrode proprement dite est constituée d'une lame ou d'un fil de platine ; la solution dans laquelle on doit mesurer le pH doit être saturée d'hydrogène sous la pression atmosphérique ; le potentiel de référence doit être placé dans un compartiment distinct de la cellule de mesure. Cette méthode est inutilisable pour les solutions trop oxydantes ou trop réductrices. Le platine s'empoisonne rapidement et l'électrode doit être replatinée à chaque mesure.

*Remarque.* Une jonction purement ionique doit assurer la continuité du milieu conducteur ; elle ne peut en aucun cas être constituée d'un conducteur métallique. Cela est réalisé pratiquement en plaçant entre les deux compartiments un obstacle qui s'oppose au passage des ions tout en assurant une continuité du milieu conducteur. Par exemple, on a toujours employé un gel d'agar-agar rendu conducteur par un électrolyte indifférent (KCl, $KNO_3$). Ce gel est le plus souvent supporté par un tube en U (appelé pont d'agar-agar) dont chacune des extrémités plonge dans un des compartiments.

* *Électrode de verre*

Il existe heureusement d'autres électrodes plus simples ; l'électrode en verre est constituée par une membrane de verre de composition spéciale qui possède les propriétés suivantes : lorsque les deux faces de cette membrane sont baignées par deux solutions de pH différents respectivement égaux à $pH_1$ et $pH_2$ (*fig.* 50), il apparaît entre les parois de la membrane une différence de potentiel, à 20 °C, égale à :




| Pt | Hg | $Hg_2Cl_2$ | KCl sat. | solution de référence | verre | solution mesurée | KCl sat. | $Hg_2Cl_2$ | Hg | Pt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1re électrode de référence | | | | | | | 2e électrode de référence | | | |

fig. 53

Richard Colin

$$\Delta E = A + 0{,}58\ (pH_1 - pH_2).$$

A est une caractéristique de l'électrode, appelée potentiel d'oxymétrie, qui est de quelques millivolts et peut varier lentement avec le temps. Elle doit donc être déterminée par étalonnage avant chaque mesure. Donc, si on connaît A et $pH_1$, E permet la détermination de $pH_2$.

Chacune des électrodes de référence définit une origine des potentiels dans le compartiment où elle baigne. La différence de potentiel apparaissant entre $R_1$ et $R_2$ est donc égale à celle existant entre les parois de la membrane de verre.

Du point de vue de la réalisation pratique, une électrode de verre est constituée par un bulbe de verre de composition adéquate, soudé à l'extrémité d'un tube. Le compartiment interne contient une solution de référence $pH = pH_0$, dans laquelle baigne l'électrode de référence $R_0$ ; la détermination d'un pH consiste à placer cet ensemble dans la solution à étudier, et à mesurer la différence de potentiel apparaissant entre l'électrode de référence $R_0$ et l'électrode extérieure $R_e$ (*fig.* 51 et 52).

Les électrodes $R_e$ et $R_0$ peuvent être différentes ; soit $E_0$ et $E_e$ leurs potentiels respectifs, la d. d. p. mesurée est de la forme :

$$\Delta E = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH - pH_0).$$

Le plus souvent, l'électrode interne est soit en calomel, soit en argent-chlorure d'argent.

Il faut donc connaître $(E_0 - E_e) + A$ et $pH_0$ pour faire une mesure. On prend une solution connue comme $pH_T$ :

$$\Delta E_T = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH_T - pH_0)$$
$$\Delta E_x = (E_0 - E_e) + A + 0{,}058\ (pH_x - pH_0)$$
$$\Delta E_x - \Delta E_T = 0{,}058\ (pH_x - pH_T)$$

Pratiquement, l'étalonnage se fait automatiquement à l'aide d'un montage électrique ou électronique.

● *Avantages et inconvénients :* détermination rapide et précise ; résistivité élevée : il faut une impédance élevée précise ; résistivité élevée : il faut une impédance élevée pour le pH-mètre de l'ordre de $10^{12}\Omega$ ; la membrane de verre doit être saturée d'eau ; le choix du verre dépend des pH à mesurer.

● *Caractéristiques des mesures* pH-*métriques à l'aide de l'électrode en verre.* L'expérience montre qu'une mesure de pH à 0,01 unité près exige de grandes précautions expérimentales :

— *température :* au voisinage de 20 °C, une variation de 1 °C se traduit par une erreur voisine de 0,005 pH ;

— *étalonnage :* il faut faire attention au fait que l'électrode de verre n'est pas linéaire, donc il faut choisir une solution d'étalonnage dont le pH est très voisin de celui que l'on veut mesurer ;

— *agitation :* l'agitation crée des charges électrostatiques ;

— *modification des solutions.*

● *Réalisation pratique des électrodes :* l'électrode au calomel est constituée par un fil de platine plongeant dans du mercure recouvert de calomel, lui-même baigné par une solution saturée de chlorure de potassium.

Le mercure métallique est en équilibre avec les ions $Hg_2^{++}$ du calomel suivant la réaction

$$2\ Hg - 2\ e \leftrightarrows Hg_2^{++}$$

d'où l'apparition d'un potentiel d'oxydoréduction.

Le schéma de la chaîne est représenté sur la *figure* 53.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{RT}{2\ F} \log_{10} \frac{(Hg_2^{++})}{(Hg_2)^2}.$$

La concentration en ions $Hg_2^{++}$ est gouvernée par le produit de solubilité du calomel

$$(Hg_2^{++})\ (Cl^-)^2 = S$$

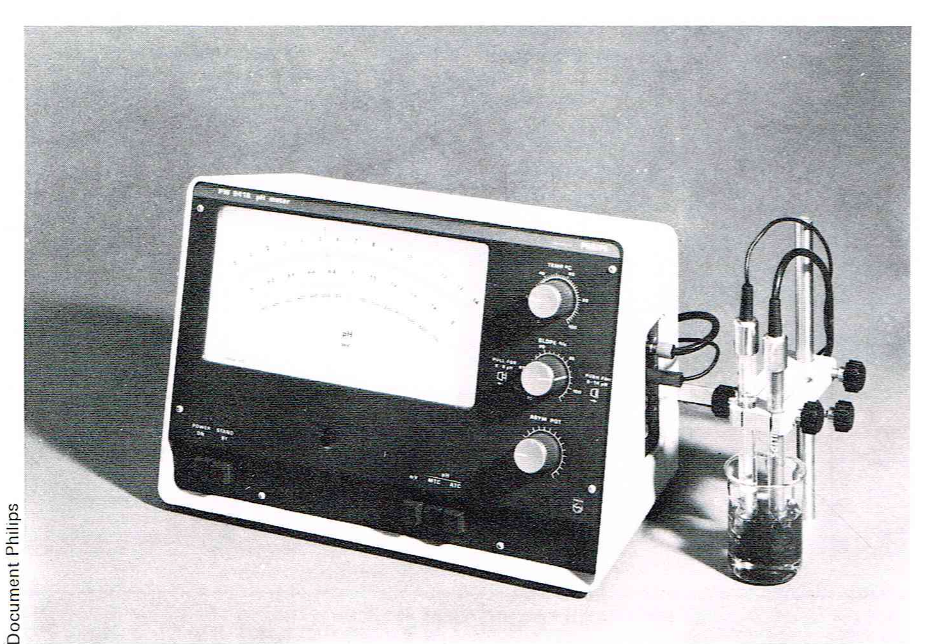
et comme la concentration en ions $Cl^-$ est constante puisque la solution est saturée en KCl, il en est de même pour la concentration en ions $Hg_2^{++}$. Le potentiel $\varepsilon$ est donc constant lui aussi.

Pratiquement, $\varepsilon$ vaut 246 mV à 25 °C par rapport à l'électrode normale d'hydrogène que nous prenons comme origine des potentiels, et varie avec la température d'environ 0,7 mV par °C. La principale difficulté dans la réalisation d'une électrode au calomel réside dans la jonction entre la solution de chlorure de potassium et la solution dans laquelle on plonge cette électrode (problème de deux solutions différentes ; il apparaît une différence de potentiel appelée « potentiel de jonction liquide », qui varie avec la mobilité et la concentration des ions en présence, ainsi qu'avec le mode de jonction réalisé).

La réalisation de l'électrode de verre se fait de la façon suivante : une électrode de référence au calomel plonge dans un tube à l'extrémité duquel on a soufflé un bulbe très mince de verre spécial. Ce tube et le bulbe sont remplis d'une solution de pH connu et constant (pH de référence) ; ils sont immergés dans le liquide à contrôler (pH inconnu). Dans cette solution inconnue plonge une seconde électrode de référence au calomel.

La mesure se fait aux bornes des deux électrodes de référence.

▲ ***Figure 51 :*** ***mesure du pH avec une électrode de verre (réalisation pratique).***
***Figure 52 :*** ***les trois types d'électrodes utilisées en pH-métrie : électrode de verre, électrode de référence, et électrode combinée.***
***Figure 53 :*** ***schéma conventionnel de la chaîne réalisée entre les électrodes d'un pH-mètre, la solution de référence et la solution à mesurer.***




Document Philips

▲ *Ci-dessus, un pH-mètre de laboratoire et son millivoltmètre ; les données sont affichées directement en unités pH (de 0 à 14) ou en millivolts (— 700 mV à + 700 mV).*
*Figure 55 : notion de pression statique des fluides dans une conduite.*
*Figure 56 : notion de pression totale des fluides dans une conduite.*

## Mesures de pressions et de vitesses dans les fluides

Dans la chaîne de mesures dont nous avons donné le schéma au début, nous nous plaçons encore en tête du capteur pour examiner l'élément sensible à la grandeur à saisir. La description des sondes qui sont le plus souvent des sondes de pression ou des sondes anémométriques nous conduit à une justification expérimentale s'appuyant sur les principes, donnés ici très sommairement, de la mécanique des fluides.

### *Écoulement dans les conduites*

Considérons le cas très particulier d'une canalisation de section S parcourue par un écoulement d'un fluide incompressible de masse spécifique $\rho$, de viscosité dynamique $\mu$, la vitesse $v$ du fluide étant supposée constante dans toute la section droite de la canalisation (*fig.* 54). Supposons de plus que l'écoulement soit permanent, c'est-à-dire que l'écoulement garde les mêmes caractéristiques au cours du temps.

Dans ces conditions, il est possible de formuler un certain nombre de résultats importants.

#### Notion de charge

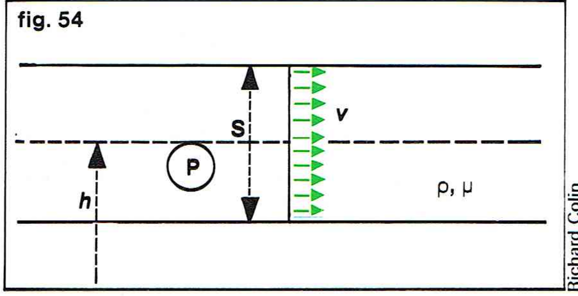
On désigne sous le nom de charge du fluide l'énergie du fluide par unité de débit-poids ; cette charge s'exprime en hauteur de fluide.

Il y a trois origines de charge : la pression du fluide P (une détente permettrait en effet de fournir du travail) ; l'altitude $h$ du fluide par rapport à un niveau de référence (la chute de la masse du fluide dans le champ de pesanteur fournirait du travail) ; l'énergie cinétique (qui représente encore une réserve de travail).

On notera par $\mathcal{H}$ la charge moyenne du fluide dans la section définie par

$$\mathcal{H} = \frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2\,g}$$

où $g$ est l'accélération de la pesanteur.



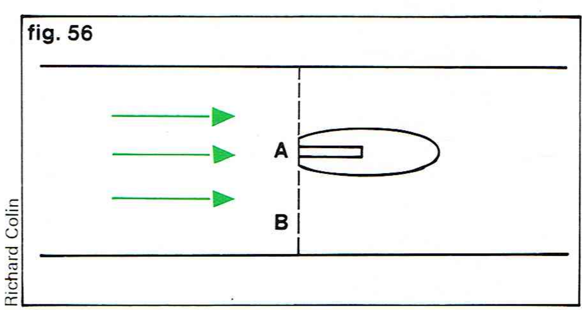

Richard Colin

▶ *Figure 54 : écoulement d'un fluide incompressible dans une canalisation.*

fig. 55

P

Richard Colin




Richard Colin

L'énergie du fluide dans la section S est donc égale au produit de la charge par le débit-poids :

$$E = Q_\rho\, \mathcal{H} = \rho g v S = \left(\frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2\,g}\right) \rho g v S.$$

Pour pouvoir mesurer la charge d'un fluide, il est essentiel que l'écoulement soit permanent et unidirectionnel (canalisation rectiligne).

#### Pression statique

Nous avons admis que la vitesse était constante dans toute la section S. On démontre de plus que

$$\frac{P}{\rho g} + h$$

est constante dans la section droite, ce qui signifie que, dans une section perpendiculaire à l'écoulement, les variations de pression P sont uniquement dues à des différences d'altitude (*fig.* 55).

Une sonde de pression placée en paroi permet de mesurer la pression qui règne dans le fluide. D'une manière plus générale, toute sonde de pression placée tangentiellement à l'écoulement donnera une mesure de la pression statique.

Une correction de pression statique dans une section droite ne se justifie que pour les canalisations de très fort diamètre traversées par un liquide.

#### Pression totale

Considérons cette fois une cavité placée frontalement à l'écoulement (*fig.* 56). Au point A, le fluide est immobile. Il possède toutefois la même énergie que le fluide environnant. La charge en A est égale à la charge en B.

$$\frac{P_a}{\rho g} = \frac{P_b}{\rho g} + \frac{v^2}{2\,g}$$

Il en résulte que la pression totale $P_a$ mesurée en un point d'arrêt A est égale à la pression statique augmentée du terme de vitesse

$$P_a = P_b + \rho \frac{v^2}{2}$$

#### Notion de perte de charge

Lorsqu'un fluide visqueux se déplace à l'intérieur d'une conduite, les frottements du fluide sur les parois occasionnent une dissipation d'énergie, ce qui se traduit par une diminution de la charge du fluide de l'amont vers l'aval.

Entre les sections $S_1$ et $S_2$ (*fig.* 57), la charge du fluide a chuté d'une valeur $\Delta\mathcal{H}$ telle que

$$\Delta\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 - \mathcal{H}_2.$$

On distingue deux familles de pertes de charge : les pertes de charge régulières et les pertes de charge singulières.

* *Pertes de charge régulières :* ce sont les dissipations d'énergie qui apparaissent principalement le long de la conduite. Elles sont proportionnelles à la longueur de la canalisation.

On distingue deux régimes d'écoulement : les régimes dits laminaires pour lesquels les pertes de charge régulières sont sensiblement proportionnelles à la vitesse ; les régimes dits turbulents pour lesquels les pertes de charge régulières sont sensiblement proportionnelles au carré de la vitesse. Il serait trop long de définir les critères permettant de différencier ces deux types d'écoulement (nombre de Reynolds critique). Sachons simplement qu'au plan industriel, les écoulements sont le plus souvent turbulents (exception faite des canalisations véhiculant des liquides fortement visqueux).

* *Pertes de charge singulières :* dès que le fluide rencontre une singularité dans la canalisation (coude, élargissement, vanne, etc.), il y a une perte locale d'énergie. La singularité est caractérisée par un coefficient de perte de charge K. La perte de charge singulière se calcule par la relation

$$\Delta \mathcal{H} = K \frac{v^2}{2g}$$

Lorsque l'on désire déterminer expérimentalement la perte de charge occasionnée par une singularité, il convient de la placer entre deux portions rectilignes de canalisation pour que les mesures aient un sens. Le coefficient K est en général donné par le constructeur.

### *Les sondes de mesure de pression-vitesse et débit*

Nous nous bornerons à la description des sondes les plus couramment utilisées en métrologie industrielle.

#### Sondes de pression

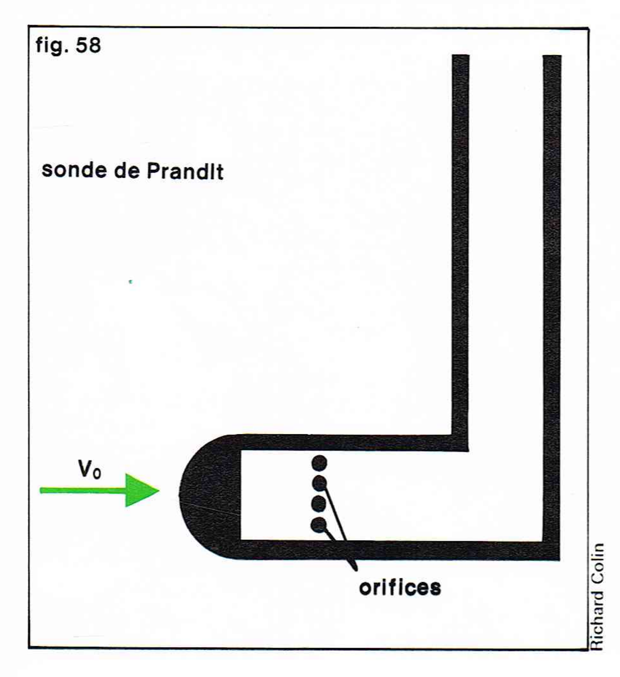
* *Prise de pression en paroi*

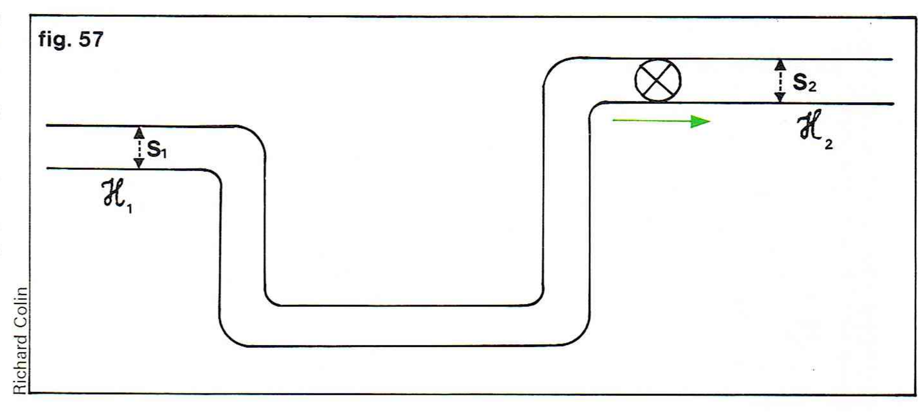
Dans la paroi d'une canalisation rectiligne parcourue par un écoulement de fluide permanent, on perce un orifice. Cet orifice est relié par un tube au manomètre permettant la lecture de la pression statique P. L'orifice doit ne pas être trop grand et avoir un état de surface soigné.

* *Prise de pression statique au sein de l'écoulement*

La sonde de Prandtl (*fig.* 58) est destinée à la mesure locale de la pression statique. Les prises de pression statique sont disposées sur un tube cylindrique positionné parallèlement à l'écoulement $v_0$. Les orifices sont placés à une certaine distance du nez hémisphérique de la sonde, afin que l'écoulement soit tangentiel à la sonde, et à une distance suffisante de la canne support, pour être insensible à la recompression au point d'arrêt de ce support.

Une erreur de parallélisme inférieure à 5° entre la direction de la sonde et la direction de l'écoulement n'entraîne pas de variation sensible de la mesure de pression statique.




▲ *Figure 57 :* ***notion de perte de charge à l'intérieur d'une conduite.***

◀ *Figure 59 :* ***un pitot simple : cet appareil permet de mesurer la pression totale du fluide ou pression d'arrêt dans une conduite.***

* *Prise de pression totale ou pression d'arrêt*

L'antenne la plus fréquemment utilisée est le pitot simple (*fig.* 59). Le point d'arrêt est obtenu sur le nez de la sonde positionnée parallèlement à la vitesse. Un orifice placé au nez permet la mesure de la pression d'arrêt ou pression totale. Les diamètres des sondes peuvent être très petits dans le cas de mesures locales fines. Le diamètre de l'orifice par rapport à celui de la sonde devra être grand lorsque des erreurs de parallaxe sont possibles (mesures correctes jusqu'à 13° d'erreur pour un orifice de 0,46 D).

Lorsque l'on connaît la position de la sonde, la mesure de pression totale permet l'estimation de la charge du fluide :

$$\mathcal{H} = \frac{P}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2g} = \frac{P_a}{\rho g} + h$$

Tant pour les sondes de pression statique que pour les sondes de pression totale présentées ci-dessus, la lecture de pression est effectuée par un manomètre placé à une certaine distance. Il en résulte que les mesures de ce type sont des filtres passe-bas, ayant une fréquence de coupure très faible. Pratiquement, les lectures ne sont valables que pour des grandeurs constantes dans le temps ou très lentement variables. Lorsque les pressions à mesurer sont variables rapidement dans le temps, on a le plus souvent recours à des capsules manométriques équipées de quartz piézo-électriques.

#### Sondes de vitesse

* *Pitot double*

La sonde dite « pitot double » (*fig.* 60) est la combinaison des deux sondes de pression statique et totale. Deux tubes cylindriques concentriques délimitent deux espaces dont l'un est en communication avec des prises de pression statique et l'autre en liaison avec la prise de pression totale. On dispose à la sortie de la canne des deux pressions dont la différence est proportionnelle au carré de la vitesse locale.

Le dimensionnement du pitot double résulte du compromis entre des exigences des prises de pression statique et de pression totale vues plus haut. Cette antenne reste exacte pour des erreurs d'alignement allant jusqu'à 15°. Les modèles courants ont un diamètre de l'ordre de 10 mm.

◀ *Figure 58 :* ***une sonde de Prandtl destinée à la mesure locale de la pression statique au sein d'un écoulement de fluide.***

▶ ***Figure 60 :* un pitot double permettant de mesurer la vitesse d'un fluide.**

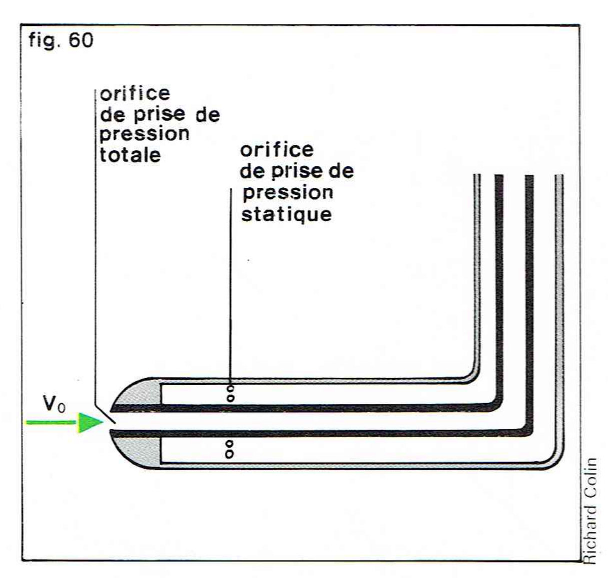



fig. 61

Richard Colin

▶ ***Figure 61 :* montage du fil chaud F (anémomètre à fil chaud) dans un pont de Wheatstone.**

Le pitot double ne permet des mesures que dans les écoulements stationnaires. $v$ = cte, toujours pour les raisons invoquées plus haut.

* *Anémomètres à indications électriques*

Ces appareils ont la particularité précieuse de se prêter à la mesure ponctuelle d'une vitesse variable en fonction du temps. Ils sont d'un très grand intérêt dans les mesures de turbulences et dans les explorations de couches limites.

Le principe de l'anémométrie à fil chaud est fondé sur la relation entre la vitesse du fluide et la perte de chaleur d'un fil chauffé électriquement et placé dans l'écoulement. Un fil métallique fin et inoxydable (platine, nickel) est chauffé électriquement par un courant d'intensité $i_0$ à une température $\theta_0$, sa résistance est $R_0$. Quand ce fil est situé dans un écoulement de vitesse $v$ perpendiculaire à l'axe du fil, l'échange thermique par convection forcée tend à faire baisser sa température, donc sa résistance qui devient R.

Deux méthodes peuvent être employées :

— soit on ne compense pas la perte thermique et on détermine expérimentalement la courbe d'étalonnage de l'appareil à intensité constante : $v = f$ (R) ou encore $v = f$ (U) avec U = différence de potentiel aux bornes du fil chaud ;

— soit on maintient la résistance $R_0$ constante en agissant sur l'intensité I du chauffage. Dans le cas d'un tel anémomètre dit « à température constante », la courbe d'étalonnage est donnée par $v = f$ (I).

On obtient une relation de la forme :

$$I^2 = I_0^2 + k\sqrt{v}$$

où $k$ est une constante dépendant du fil.

On peut lire la différence de potentiel aux bornes d'une résistance en série avec le fil chaud.

Pour maintenir constante la résistance R, on monte le fil chaud F dans un pont de Wheatstone, et $R_1$ permet le réglage de l'intensité de chauffage (*fig.* 61).

Le fil chaud possède une faible inertie; de plus, le retard introduit dans la réponse est compensé systématiquement par un circuit électrique approprié. Cet appareil permet une analyse très fine des phénomènes fluctuants

National semiconductor, France

jusqu'à des fréquences de quelques kilohertz. La bande passante dépend essentiellement des caractéristiques électriques et géométriques du fil utilisé. L'anémomètre à fil chaud est également très approprié lorsque des mesures locales sont nécessaires; ses dimensions réduites évitent de perturber l'écoulement au voisinage de la zone que l'on désire explorer.

Pour apprécier la valeur de la pression indiquée par les sondes que nous venons de voir, on utilise plusieurs types d'appareils : le tube en U et les manomètres à tube de Bourdon en C, à soufflet ou à membrane. Tous ces appareils sont destinés à être lus par un opérateur et, si l'on veut utiliser la mesure de la pression dans un automatisme, il sera nécessaire de la convertir en un signal électrique.

Nous devons signaler ici l'existence d'automatismes fluidiques qui ne demanderaient évidemment pas la conversion des pressions en grandeur électrique. Ces automatismes principalement utilisés dans des installations de compression ou de traitement de fluides présentent l'intérêt de travailler avec des grandeurs de nature homogène. Les capteurs, les éléments de calcul et les organes de puissance mesurent, traitent et sont commandés par des pressions ou des débits. Bien sûr, les éléments de calcul, qui sont surtout des comparateurs, sont beaucoup moins sophistiqués que les calculateurs électroniques. Les automatismes fluidiques sont donc principalement utilisés pour des installations de sécurité ou de régulation simple.

Dans le capteur de pression ou de débit, pour reprendre le cas général des automatismes électroniques, on aura donc un convertisseur chargé de transformer la grandeur prélevée en un signal électrique. Pour ce faire, nous avons beaucoup de possibilités. En nous référant à ce que nous avons vu précédemment, nous pouvons lier à la déformation d'une membrane une sonde de déplacement comme un transformateur différentiel, une sonde piézo-électrique ou des jauges de contrainte, pour n'en citer que quelques-unes. De nouveaux capteurs de pression liés aux propriétés des semi-conducteurs ont vu le jour. Leur intérêt réside dans le fait que la sonde et les éléments d'adaptation et d'amplification sont fabriqués suivant les techniques de miniaturisation de l'électronique : cela conduit à une réalisation très peu encombrante, très robuste et fiable, ainsi qu'à des possibilités de construction en grande série permettant un bas prix de revient.

### Conclusion

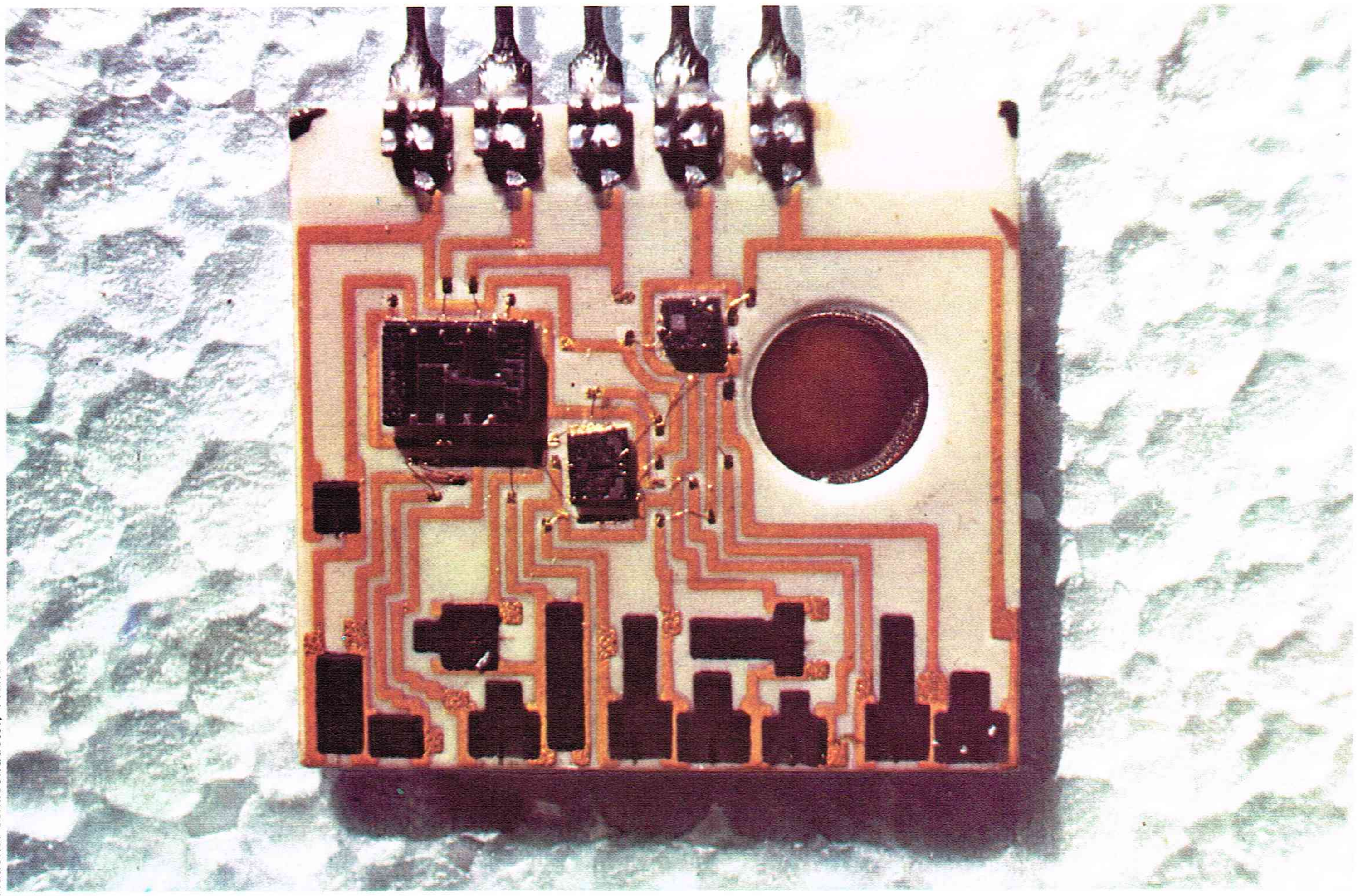
A ce point, il reste une multitude de capteurs à examiner. Cependant, dans beaucoup d'entre eux, on reconnaîtrait les éléments que nous venons de décrire. Bien sûr, les quelques paragraphes précédents ne sont pas complets; mais ils ont l'ambition de préciser ce que l'on entend par « capteur » et de donner un certain nombre d'exemples parmi les plus répandus et les plus démonstratifs ou caractéristiques.

Ce qu'il paraît important d'écrire, à propos des capteurs, c'est qu'il s'en invente tous les jours, mais que seuls ont un avenir industriel ou dans les laboratoires ceux qui sont suffisamment bien adaptés aux conditions de travail qui règnent en ces lieux. Beaucoup d'idées très astucieuses se sont heurtées à la mise en œuvre technique et aux limites de la technologie qui ne permettaient pas de réaliser un capteur suffisamment précis tout en étant convenablement protégé des perturbations extérieures. Inversement, tout progrès technologique est exploité pour l'amélioration des capteurs existants ou pour la réalisation de capteurs n'ayant pas encore pu voir le jour à cause de ces limites.

## BIBLIOGRAPHIE

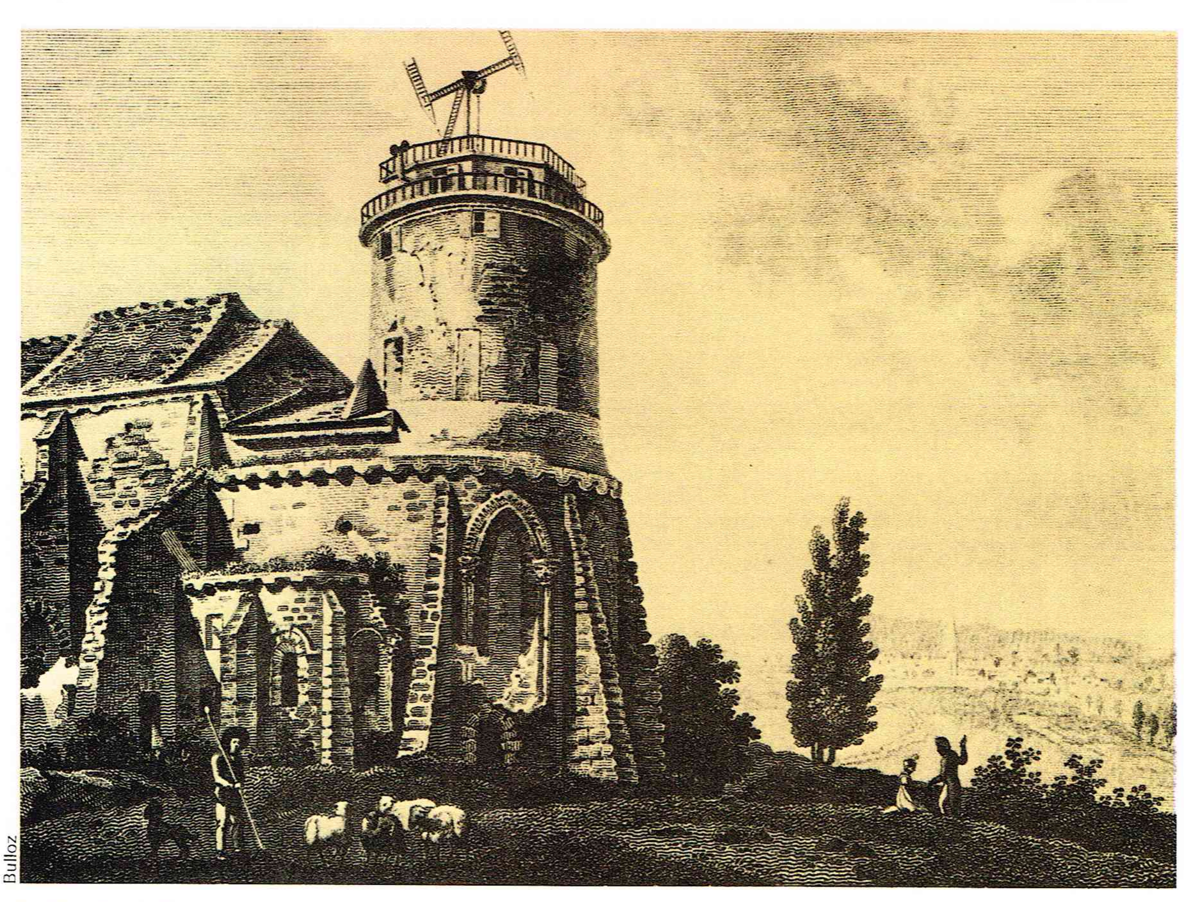
BASSIÈRE M., GAIGNEBET E., *Métrologie générale. Théorie de la mesure. Les Instruments et leur emploi*, Paris, Dunod, 1966. - BROUSSAUD, *Optoélectronique*, Paris, Masson. - DISA ELEKTRONIK A. S., Denmark, *Hot-Wire Anemometer* « Probe Manual ». - ZELBSTEIN U., *Mesures électroniques au laboratoire et dans l'industrie. Physique des capteurs*, Paris, Dunod, 1969.

*◄▼ Page ci-contre, en bas, intérieur du capteur figurant ci-dessous : le transducteur de pression, deux pastilles d'amplificateurs opérationnels intégrés et le réseau de résistances à couche épaisse ajustées au laser sont montés sur un support de céramique. Ci-dessous, un capteur de pression (LX 162 Z) à semi-conducteurs dans sa présentation finale.*



National semiconductor, France

▶ *Un système ancien de transmission : le télégraphe optique de Montmartre (sur l'église St-Pierre de Montmartre) : il s'agit là d'un télégraphe selon la technique de Chappe.*


Bulloz

# LE CODAGE

La transmission de l'information à travers un canal éventuellement soumis à des perturbations pose deux problèmes : la reproductibilité du signal à l'arrivée et l'utilisation au maximum des possibilités de l'ensemble de la transmission. Pour la reproductibilité, il faut se définir un critère. Actuellement, on utilise en général, dans le cas de la transmission de signaux continus, une fonction quadratique $c(t) = E[x(t) - y(t)^2]$. $E[\cdot]$ est l'opérateur espérance mathématique, c'est-à-dire moyenne probabiliste, $x(t)$ et $y(t)$ étant respectivement les signaux émis et reçu. Auparavant (et dans encore beaucoup d'applications), on utilisait aussi la fonction appelée rapport signal sur bruit définie par $\eta = \frac{P_{x(t)}}{E[n^2(t)]}$ où $P_{x(t)}$ est la puissance du signal émis et $n(t)$ le bruit, c'est-à-dire l'ensemble des perturbations au canal. Dans le cas de la transmission de signaux discrets, le critère pris est la probabilité d'erreur définie au début de la partie *Information*. Quant à l'utilisation de la voie de communication, elle est caractérisée par le rapport $\frac{I(X;Y)}{C}$, $I(X;Y)$ étant l'information transmise entre la source X et le destinataire Y, C la capacité du canal. Ce rapport est compris entre 0 et 1, l'efficacité maximale étant atteinte lorsque l'information transmise est égale à la capacité du canal.

Il y a deux manières pour éviter les déformations du signal reçu par rapport au signal émis. On peut opérer un codage préliminaire de façon à assurer une redondance, ou donner certaines clefs qui, connues de la réception, permettront de reconstituer le message : c'est la technique de codes détecteurs-correcteurs d'erreur. On peut aussi augmenter la puissance de transmission des signaux en employant des organes technologiques plus évolués de manière à surmonter les phénomènes perturbatoires. La première technique est en général d'un coût plus faible, mais introduit un retard à la réception (technique de reconnaissance et éventuellement de reconstruction), tandis que la seconde permet une détection instantanée, mais demande un investissement plus important. Dans les deux cas, il faut faire appel aux méthodes de décision statistique (traitement du signal) pour reconnaître le message émis dans le message reçu. L'utilisation du codage ou de l'amplification dépend du cas d'espèce; nous ne traiterons dans cette partie que le codage. Comme les codes les plus utilisés sont les codes composés à partir d'un alphabet à deux caractères représentés symboliquement par $\{0, 1\}$ nous prendrons systématiquement cet exemple. Nous traiterons successivement le codage dans le cas de canaux sans bruits, puis le codage utilisé pour des canaux soumis à des perturbations.

## *Codage de sources dans le cas de canaux sans bruit*

Nous raisonnons dans le cas de sources discrètes au nombre fini N de messages $x_1 \dots x_N$. Un codage est une application qui à chaque message $x_i$ fait correspondre un ou plusieurs mots-codes, suites de symboles écrits avec un alphabet de taille D. Par exemple, si notre suite de messages est constituée des lettres de l'alphabet A, B, ..., Z et qu'on utilise le code Beaudot à deux caractères désignés conventionnellement par $\{a, b\}$, E est codé par *abaaa*, Z par *abaab*. Le but d'un codage est d'assurer l'adaptation de la source au canal, la capacité maximale de transmission d'information du canal étant $\log_2 D$.

### *Quelques définitions*

$x_1, \dots, x_N$ messages de la source ont pour probabilités respectives $p(x_1) \dots p(x_N)$. Avec les lettres de l'alphabet de taille D du code, on constitue des mots-codes $m_1, \dots, m_N$ qu'il s'agit d'associer de manière si possible unique à $x_1 \dots x_N$. Un code est dit **non singulier** lorsque tous les mots-codes sont distincts.

*Exemple* 1

| Message | Mot-code |
|---|---|
| $x_1$ | 0 |
| $x_2$ | 10 |
| $x_3$ | 01 |
| $x_4$ | 00 |

Ce code semble non singulier, puisque tous les mots-codes sont distincts. Toutefois, si on considère l'ensemble

TÉLÉPHONES ET PHONOGRAPHES

A L'EXPOSITION UNIVERSELLE

Archives Snark

◀ ***Réception de sons grâce au téléphone et au phonographe à l'Exposition universelle de 1889.***

suivant reçu 0010, on peut le décoder comme $x_1$, $x_3$, $x_1$ ou comme $x_4$, $x_2$. Il y a donc ambiguïté. Si on emploie des mots-codes de même longueur $l$, il y a $D^l$ mots-codes possibles et il faut dans ce cas que $N < D^l$. Un code est dit décryptable de manière unique si, à toute séquence quelconque de caractères du code, correspond une suite unique de messages de la source. Le code de l'exemple précédent n'est pas décryptable de manière unique. L'exemple 2 ci-dessous correspond au même ensemble de messages.

*Exemple* 2

| | |
|---|---|
| *Exemple* 2 | 0 |
| | 01 |
| | 011 |
| | 0111 |

Il a la propriété évoquée, car le caractère 0 indique systématiquement le début d'un mot.

Une manière très simple d'obtenir des codes binaires décryptables de manière unique, lorsque le nombre de messages à coder est une puissance de 2, est d'utiliser un code dont tous les mots ont même longueur et où le mot-code de chaque mot est la traduction en binaire du rang du message (les messages étant ordonnés séquentiellement de manière arbitraire).

*Exemple* 3

Soit 8 messages à coder, on emploiera donc des mots-codes de longueur 3.

| Message | Rang (arbitraire) | Mot-code | Message | Rang | Mot-code |
|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 0 | 000 | $x_5$ | 4 | 100 |
| $x_2$ | 1 | 001 | $x_6$ | 5 | 101 |
| $x_3$ | 2 | 010 | $x_7$ | 6 | 110 |
| $x_4$ | 3 | 011 | $x_8$ | 7 | 111 |

Cette méthode est très simple, mais nécessite qu'on se rapporte à la puissance de 2 la plus proche; elle a l'inconvénient de ne pas tenir compte des probabilités d'apparition des messages (les messages les plus fréquents comme les plus rares ont des mots-codes de même longueur) ; en fait, dans ce cas, les messages sont considérés comme équiprobables.

Prenons un quatrième exemple, encore un code décryptable de manière unique :

*Exemple* 4

| Message | Mot-code |
|---|---|
| $x_1$ | 0 |
| $x_2$ | 10 |
| $x_3$ | 110 |
| $x_4$ | 111 |

La différence entre le code de cet exemple et celui de l'exemple 2 est qu'on peut décoder immédiatement toute suite du code de l'exemple 4 sans aucune référence aux mots suivants. En effet, prenons l'exemple suivant :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Code 4 | 10 | 110 | 0 | 0 | 111 |
| | $x_2$ | $x_3$ | $x_1$ | $x_1$ | $x_4$ |
| Code 2 | 0 | 111 | 00 | | |

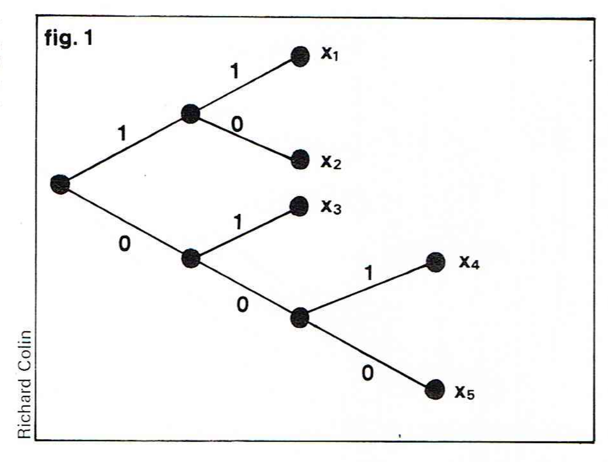
On ne peut prendre aucune décision après le premier 0, puisque ce peut être $x_1$ ou $x_2$ ou $x_3$ ou $x_4$ ; après réception de 01, ce peut être $x_2$, $x_3$ ou $x_4$; après 011, $x_3$ ou $x_4$; pour 0111, on est certain de $x_4$. (Le décodage complet donne $x_4\, x_1\, x_1$.)

Les codes qui ont la propriété décrite ci-dessus sont dits **instantanés**. En fait, pour les obtenir, il suffit d'empêcher qu'un mot-code ne puisse être obtenu à partir d'un autre plus court en y ajoutant des caractères. C'est la propriété du préfixe. On dit que A, suite finie de caractères du code, est préfixe de B si B s'écrit AC, quelle que soit la suite finie C.

Ainsi, dans le code 2, le mot-code correspondant à $x_2$ (01) est préfixe de celui correspondant à $x_3$ (011). Une condition nécessaire et suffisante pour obtenir un code instantané est qu'aucun mot-code ne soit préfixe d'un autre. Les codes instantanés sont en fait des cas particuliers des codes à décryptage de manière unique. Les codes instantanés peuvent être obtenus très facilement à l'aide de structures arborescentes. Soit l'exemple suivant : prenons comme mot-code origine correspondant au message $x_1$ 11, les autres mots doivent commencer par 01 ou 10 ou 00, $x_2$ sera codé en 10, $x_3$ en 01, $x_4$ en 001, puis on continue... On remarque que ces mots-codes se placent sur un graphe (*fig.* 1).

L'inégalité de Kraft donne une condition d'existence d'un code instantané sans toutefois fournir une méthode

▶ *Figure 1 : graphe d'un exemple de code instantané dont le mot-code origine correspondant au message $x_1$ est 11.*




d'obtention. Soit $l_1 \ldots l_N$ les longueurs respectives des mots-codes $m_1 \ldots m_N$, D la taille de l'alphabet, la condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'un code instantané est que :

$$\sum_{i=1}^{N} D^{-l_i} \leqslant 1$$

Cette inégalité est aussi une condition nécessaire pour l'existence d'un code décryptable de manière unique.

Reprenons les différents exemples proposés :

Code 1 (D = 2) : $2^{-1} + 2^{-2} \cdot 3 = 1{,}25$, non décryptable de manière unique.

Code 2 : $2^{-1} + 2^{-2} + 2^{-3} + 2^{-4} = 0{,}94$, code décryptable de manière unique.

Code 4 : $2^{-1} + 2^{-2} + 2 \cdot 2^{-3} = 1{,}00$, code décryptable de manière unique.

Nous raisonnerons dans ce qui suit sur des codes instantanés.

## *Encadrement de la longueur moyenne d'un mot-code*

A une transmission on peut associer un coût. Puisqu'on se place dans le cas où il n'y a aucun phénomène perturbatoire, on peut prendre comme fonction-coût la longueur moyenne d'un mot-code, admettant implicitement — ce qui semble logique — que la transmission de tout caractère du code est de coût identique. Logiquement, on définira cette longueur moyenne $\bar{l}$ par

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^{N} p\ (x_i)\ l_i$$

$l_i$ étant la longueur du mot-code associé au message $x_i$. Raisonnons sur un code à deux caractères. L'entropie de la source $(x_1 \ldots x_N)$ s'exprime simplement :

$$H\ (X) = -\sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 p\ (x_i)$$

$$H\ (X) - \bar{l} = -\sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 p\ (x_i) - \sum_{i=1}^{N} l_i\, p\ (x_i)$$

$$= \sum_{i=1}^{N} p\ (x_i) \log_2 \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)}$$

Comme pour $x > 0$, $\log\ (x) \leqslant x - 1$ (égalité si $x = 1$), il vient tout simplement

$$\log_2 \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)} \leqslant \frac{2^{-l_i}}{p\ (x_i)} - 1$$

Soit

$$H\ (X) - \bar{l} \leqslant \sum_{i=1}^{N} 2^{-n_i} - 1$$

$\leqslant 0$ d'après l'inégalité de Kraft.

Par suite, pour un code binaire :

$$\bar{l} \geqslant H\ (X).$$

La borne inférieure pour un code écrit dans l'alphabet binaire est donc l'entropie de la source. Si on avait employé un alphabet à D caractères, on aurait trouvé $\frac{H\ (X)}{\log D}$. Un code dont la longueur moyenne atteint ce minimum est dit code optimal. Une manière d'obtenir un tel code est de se placer (dans les lignes ci-dessus) dans le cas de l'égalité, c'est-à-dire de prendre une longueur $l_i$ de mot-code telle que $p\ (x_i) = 2^{-l_i}$ (ou $D^{-l_i}$). Ce n'est pas toujours possible, car le nombre $(-\log_2 p\ (x_i))$ $\left(\text{ou } -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 D}\right)$ n'est pas toujours entier. On peut donc encadrer $l_i$ entre deux nombres :

$$-\log_2 p\ (x_i) \leqslant l_i < -\log_2 p\ (x_i) + 1$$

ou $$-\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 D} \leqslant l_i < -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 D} + 1.$$

Cette dernière relation fournit les bornes entre lesquelles est toujours comprise la longueur moyenne d'un mot-code.

$$\frac{H\ (X)}{\log_2 D} \leqslant \bar{l} < \frac{H\ (X)}{\log_2 D} + 1.$$

On peut se rapprocher de la borne inférieure en utilisant une technique appelée codage « par blocs ». Au lieu de donner un mot-code à chaque message $x_i$, on associe un mot-code à chaque suite de longueur $k$ de messages de la source. Prenons par exemple une source à deux messages $x_1$ et $x_2$ à coder en binaire et construisons le code très simple ci-dessous.

| Message | Probabilité $p\ (x_i)$ | Mot-code |
|---|---|---|
| $x_1$ | 0,75 | 0 |
| $x_2$ | 0,25 | 1 |

Puis réalisons toutes les combinaisons deux à deux de messages de la source et construisons le nouveau code ci-dessous.

| Combinaison de messages | Probabilité | Mot-code |
|---|---|---|
| $x_1x_1$ | 9/16 | 0 |
| $x_1x_2$ | 3/16 | 10 |
| $x_2x_1$ | 3/16 | 110 |
| $x_2x_2$ | 1/16 | 111 |

Dans le premier cas $\bar{l} = 1$, dans le second cas $\bar{l} = \frac{27}{16}$ pour deux messages, soit $\frac{27}{32} = 0{,}84$ caractère par message de la source. Or l'entropie H (X) vaut 0,81.

Par référence avec cette borne inférieure de la longueur moyenne d'un mot-code désignée par $l_{min}$, on peut définir l'efficacité d'un code par le rapport $\frac{l_{min}}{\bar{l}}$. La redondance est le complément à 1 de cette quantité. Soit par exemple à coder en binaire une source à quatre messages $x_1x_2x_3x_4$ de probabilités respectives 0,5, 0,25, 0,125, 0,125. Nous proposons comme premier code un code à longueur de mot fixe 2 constitué des nombres binaires associés à la suite décimale 0, 1, 2, 3.

$x_1 \to 00$ $x_2 \to 10$ $x_3 \to 01$ $x_4 \to 11$

Pour ce code, $\bar{l} = 2$, et pour cette source,

$$l_{min} = H\ (X) = \frac{7}{4} = 1{,}75 \text{ bit.}$$

L'efficacité vaut 0,875 et la redondance 0,125.

Prenons maintenant un deuxième code :

$x_1 \to 0$ $x_2 \to 10$ $x_3 \to 110$ $x_4 \to 111$

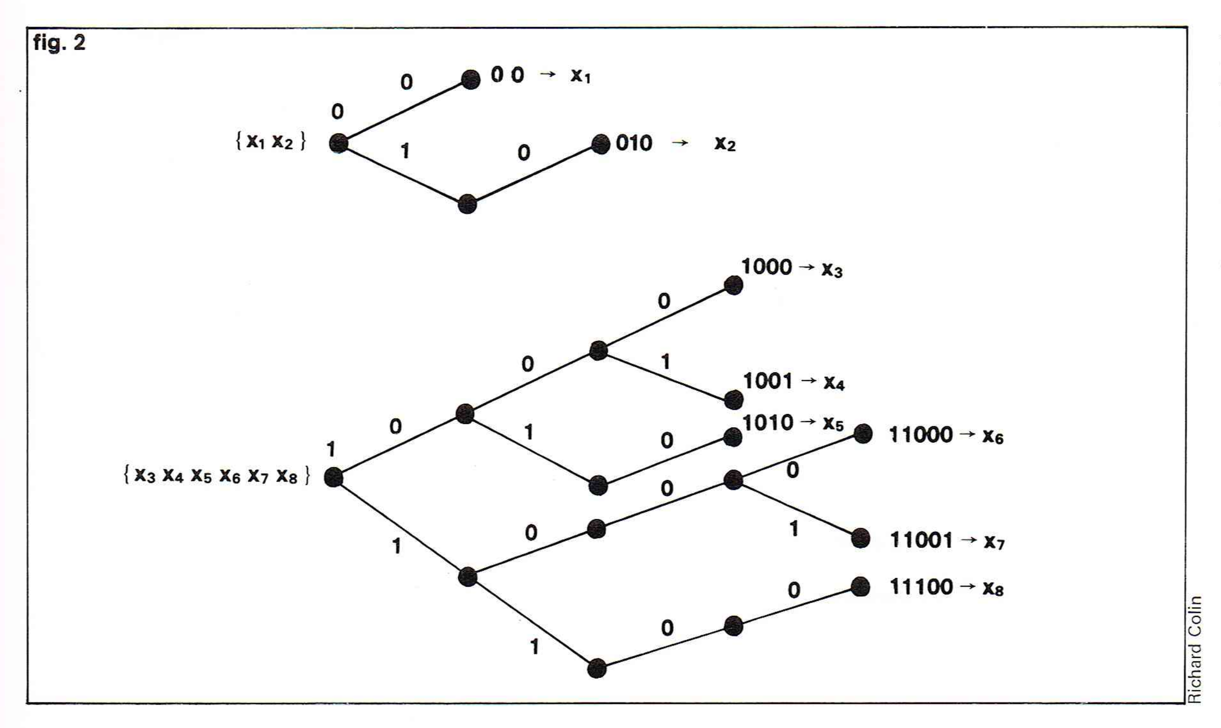
$\bar{l}$ vaut ici 1,75, l'efficacité vaut l'unité et la redondance est nulle.

## *Exemples de codes optimaux*

Pour avoir un code optimal, il faut choisir la longueur des mots-codes de façon à avoir

$$l_i = -\frac{\log_2 p\ (x_i)}{\log_2 D}.$$

Nous donnerons deux exemples de codes optimaux : le code de Shannon-Fano et le code de Huffmann.




◀ *Figure 2 : construction d'un code à partir d'un arbre de codage; on groupe les messages en deux ensembles à peu près équiprobables :* $\{x_1x_2\}$ *et* $\{x_3x_4x_5x_6x_7x_8\}$*, et affectés respectivement des chiffres 0 et 1 comme 1ers chiffres binaires, puis on élabore un arbre.*

* *Code de Shannon-Fano*

Nous nous plaçons dans le cas où les messages sont codés un par un. Nous donnons sans démonstration la méthode.

- On range les messages de façon à avoir la suite d'inégalités suivantes $p\ (x_1) \geqslant p\ (x_2) \geqslant ... \geqslant p\ (x_n)$.
- On détermine les plus petits entiers $l_i$ tels que

$$l_i \geqslant -\frac{\log_2 p\ (x_1)}{\log_2 \mathrm{D}}.$$

On a donc $l_1 \leqslant l_2 \leqslant ... \leqslant l_n$. Les messages les plus fréquents ont les mots-codes les plus courts.

- Le mot-code $m_i$ associé au message $x_i$ a pour longueur $l_i$, il est choisi de façon qu'aucun mot-code ne soit préfixe d'un autre. On s'aide pour cela d'un arbre de codage.

Soit l'exemple suivant :

| Message | Probabilité | Après calcul $l_i$ |
|---|---|---|
| $x_1$ | 0,4 | 2 |
| $x_2$ | 0,18 | 3 |
| $x_3$ | 0,10 | 4 |
| $x_4$ | 0,10 | 4 |
| $x_5$ | 0,07 | 4 |
| $x_6$ | 0,06 | 5 |
| $x_7$ | 0,05 | 5 |
| $x_8$ | 0,04 | 5 |

Partageons en deux ensembles à peu près équiprobables $\{x_1x_2\}$ et $\{x_3x_4x_5x_6x_7x_8\}$, et arbitrairement affectons « 0 » au premier et « 1 » au second comme premier chiffre binaire. Nous obtenons facilement l'arbre représenté sur la *figure* 2 :

Pour systématiser cette procédure (le graphe précédent n'est pas unique en effet), la méthode de Shannon et Fano consiste à partager successivement l'ensemble de messages en sous-ensembles de probabilités égales pour arriver aux messages eux-mêmes, à qui on affecte la suite binaire correspondant aux chiffres successifs.

Reprenons le même exemple (*fig.* 3) :

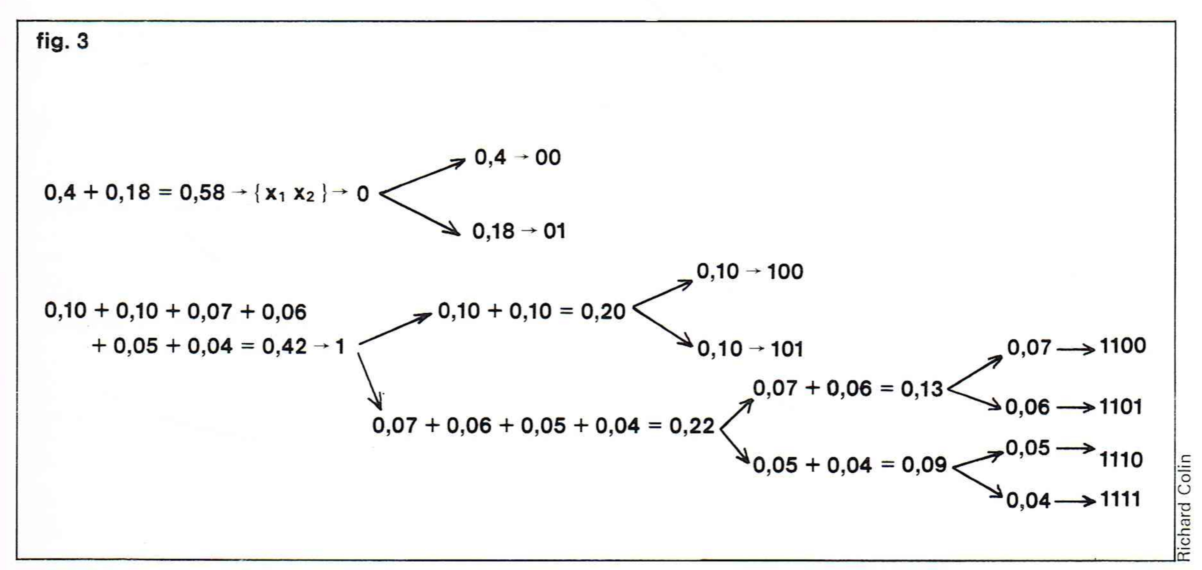
Le code ainsi obtenu n'est pas optimal, puisqu'il n'y a pas d'entier correspondant à la condition sur les longueurs des mots-codes, mais il est aussi proche de l'optimal que possible.

* *Code de Huffmann*

La méthode repose sur les deux considérations suivantes : les messages de grande probabilité doivent avoir les mots-codes les plus courts; deux messages de même probabilité doivent avoir des mots-codes de même longueur. La technique est alors la suivante (dans le cas d'un codage binaire) :

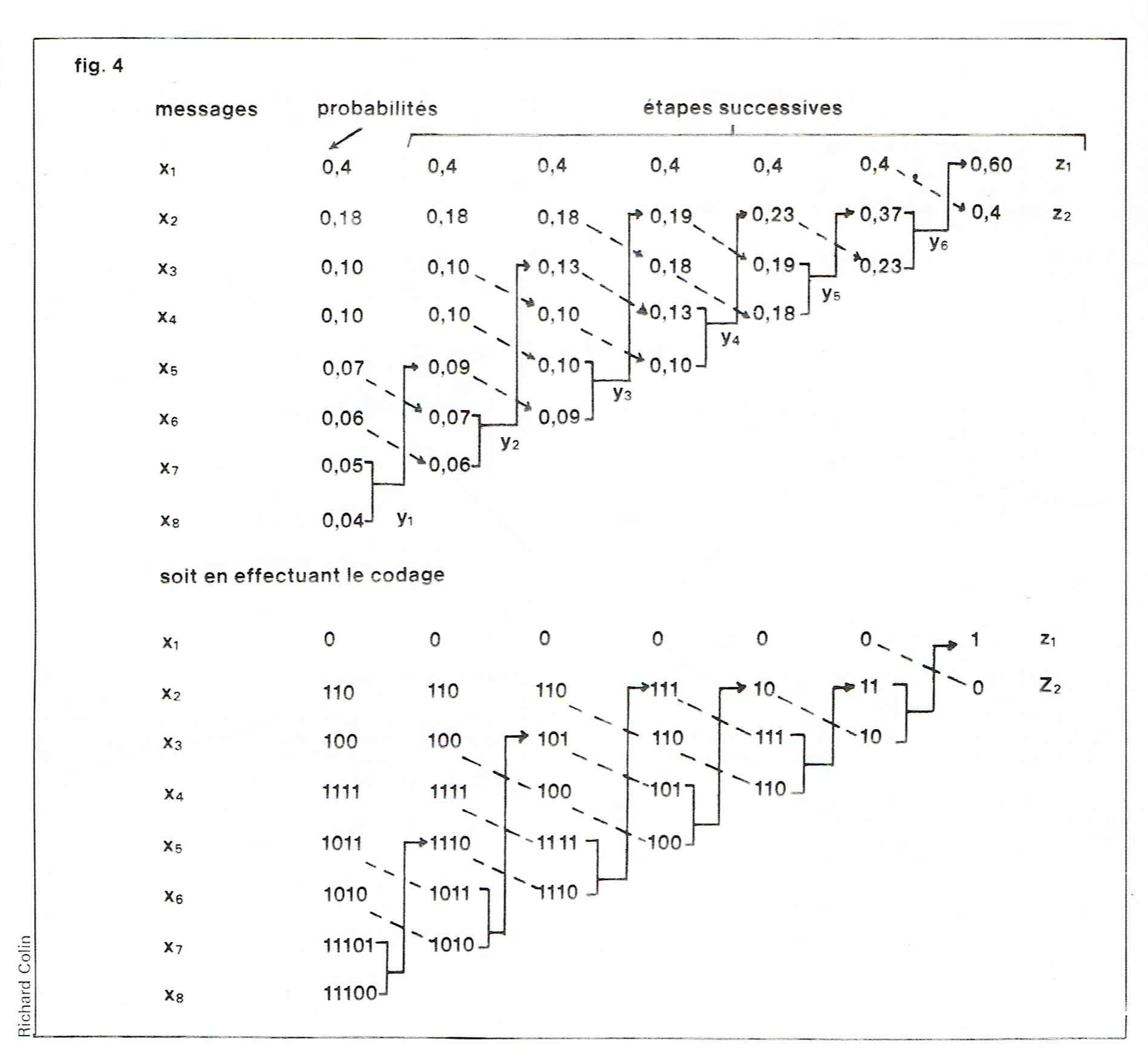
— ordonner l'ensemble des messages suivant la succession des probabilités non croissantes

$$p\ (x_1) \geqslant p\ (x_2) \geqslant ... \geqslant p\ (x_N)$$




◀ *Figure 3; méthode de Shannon-Fano pour construire un code : on partage successivement l'ensemble des messages en sous-ensembles d'égales probabilités.*

▶ *Figure 4 : application du code de Huffmann à l'exemple de la figure 2.*




▼ *Figure 5 : application du code de Huffmann à un exemple comportant 6 messages à coder avec un alphabet ternaire.*

fig. 5

| messages | probabilités | | |
|---|---|---|---|
| $x_1$ | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| $x_2$ | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| $x_3$ | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| $x_4$ | 0,05 | 0,05 | |
| $x_5$ | 0,03 | 0,05 | |
| $x_6$ | 0,02 | | |

d'où le codage

| | | | |
|---|---|---|---|
| $x_1$ | 0 | 0 | 0 |
| $x_2$ | 1 | 1 | 1 |
| $x_3$ | 20 | 20 | 2 |
| $x_4$ | 22 | 21 | |
| $x_5$ | 210 | 22 | |
| $x_6$ | 211 | | |

Richard Colin

— former des ensembles de messages pouvant être divisés en deux sous-ensembles de probabilités aussi proches que possible ;

— considérer un ensemble formé de deux messages

$$\{x_N \text{ et } x_{N-1}\};$$

— regrouper ces deux messages en un message unique $y_1$ ($p(y_1) = p(x_{N-1}) + p(x_N)$) qu'on réordonne avec $x_1 \dots x_{N-2}$

$$(p(x_1) \geqslant p(x_2) \geqslant \dots \geqslant p(y_1) \geqslant \dots \geqslant p(x_{N-2});$$

— recommencer avec les deux messages les plus improbables de la série $x_1, x_2, \dots, x_{N-2}, y_1$, puis avec la nouvelle série obtenue jusqu'à obtenir deux messages $z_1$ et $z_2$ de probabilités pratiquement égales ;

— affecter arbitrairement « 0 » à $z_1$ et « 1 » à $z_2$ puis remonter la chaîne en attribuant un « 0 » ou un « 1 » à chaque division par deux.

Un exemple fera mieux comprendre l'algorithme ; soit le même ensemble de messages à coder que dans l'exemple précédent (*fig.* 4).

La règle précédente peut se généraliser dans le cas où la taille D de l'alphabet est supérieure à 2. On groupe les messages en ensembles successifs de taille 2 + (reste de la division par (D — 1) de K — 2 si K est la taille de l'ensemble de messages à l'étape *i*).

Prenons par exemple six messages à coder avec un alphabet tertiaire (*fig.* 5). A la première étape, il faut grouper : 2 + (reste de la division de (6 — 2) par 2) = 2 messages, à la deuxième étape : 2 + (reste de la division de (5 — 2) par 2) = 2 + 1 = 3 messages, à la troisième étape : 2 + (reste de la division de (3 — 2) par 2) = 2 + 1 message.

◀ *Tracé d'un pelliculable (film de Mylar recouvert de vernis) destiné, après réduction photographique, à constituer le masque optique qui servira à la gravure d'un disque codé utilisé dans un codeur angulaire.*

M.C.B.

## *Codage de sources en présence de bruit*

La présence de bruit va entraîner des modifications du signal reçu par rapport au signal transmis. On va donc tenter de lutter contre ces perturbations par la technique du codage : quelle opération faut-il effectuer pour détecter et même, ce qui est idéal, corriger les éventuelles erreurs ? Notre exposé sera fondé sur l'utilisation du code binaire à cause de son emploi très fréquent, mais les résultats sont généralisables à des alphabets de taille plus importante.

Pour transmettre les signaux binaires, on utilise des canaux binaires dont nous avons vu la définition (voir chapitre *La théorie de l'information*) ; deux types de perturbations peuvent se produire, ce qui introduit une classification des canaux : les canaux où les erreurs arrivent par « paquets », ce qui entraîne une modification en bloc des mots-codes ; les canaux où les symboles sont affectés individuellement et indépendamment les uns des autres (par exemple, le canal binaire symétrique B. S. C.). Les deux problèmes de détection et correction des erreurs ne sont pas identiques : on peut parfois se limiter à la détection si une retransmission immédiate est possible, il faut parfois faire les deux, par exemple dans le cas où les données sont mémorisées un long temps avant leur utilisation, puisque aucune nouvelle transmission pour vérification n'est possible. On peut diviser les codes utilisés en codes-blocs et en codes récurrents. Les codes-blocs utilisent des suites de $n$ caractères $\{0, 1\}$ appelées mots. On établit une correspondance biunivoque entre l'ensemble des messages et certains mots ; ces mots sont alors les mots-codes. Il n'y a pas, en revanche, de mots-codes dans les codes récurrents, mais une succession de symboles ; ces codes, dits aussi codes convolutionnels, sont très adaptés à la correction de paquets d'erreur.

### *Décision statistique, distance de Hamming*

Nous supposerons, dans ce qui suit, être dans le cas d'application du deuxième théorème de Shannon ; on peut donc rechercher un code de façon que la probabilité d'erreur soit aussi faible qu'on le désire. Les mots-codes ayant pour longueur $n$, il y a $2^n$ mots possibles. Chaque mot peut se représenter dans un espace à $n$ dimensions par un point : chaque coordonnée correspond à un chiffre du mot (*fig.* 6).

*Exemple :*

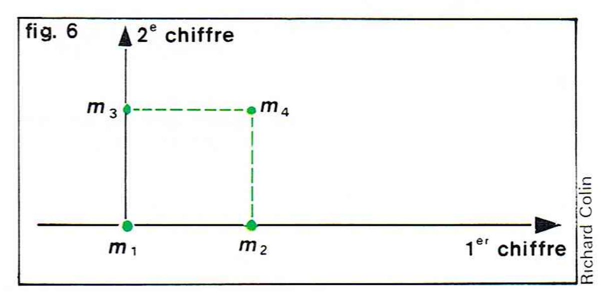
$n = 2$ — 4 mots possibles :

$m_1 = 00$ — $m_2 = 10$

$m_3 = 01$ — $m_4 = 11$

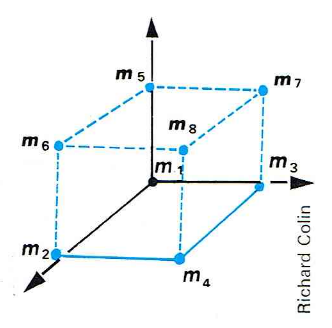
Une autre représentation possible est une représentation matricielle :

$$\mathbf{m}_2 = [1, 0].$$




◀ *Figure 6 : coordonnées des 4 mots-codes possibles de longueur $n = 2$, dans un espace à $n = 2$ dimensions : $m_1 = 00$, $m_2 = 10$, $m_3 = 01$, $m_4 = 11$.*

fig. 7




▲ ***Figure 7 : exemple de code dans un espace à 3 dimensions (voir développement dans le texte).***

Chaque élément de la matrice est un des chiffres du mot. On désignera par $m_i$ une telle matrice (nous utiliserons indifféremment dans la suite $\vec{m}_i$ et $\mathbf{m}_i$). Deux cas sont possibles : ou bien le nombre de mots-codes vaut exactement $2^n$, il n'y a aucun mot dépourvu d'information et l'information moyenne transmise par un mot-code vaut $n$ bits, donc chaque symbole porte un bit. Étant donné que tout est utilisé, il est alors impossible de détecter ou de corriger des erreurs, puisque tout mot erroné est un mot-code. Le deuxième cas est celui où l'ensemble des mots-codes est un sous-ensemble de l'ensemble des mots ; supposons donc qu'on utilise $2^m$ mots pour mots-codes ($m < n$). L'information moyenne transmise par mot-code est alors de $m$ bits et l'information moyenne par symbole de $\frac{m}{n}$ bits. Elle est évidemment plus faible que dans le premier cas, mais les mots inutilisés vont servir à la détection d'erreur (l'apparition d'un de ces mots à la sortie du canal veut bien dire qu'il y a eu erreur). Nous désignerons dans ce qui suit par C l'ensemble des mots-codes et par $\bar{C}$ l'ensemble complémentaire par rapport à l'ensemble des mots possibles. Pour juger de la relation entre deux mots, on va introduire la notion de distance de Hamming.

On appelle **distance de Hamming** $d\ (\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j)$ de deux mots-codes $m_i$ et $m_j$ le nombre de chiffres par lequel ils diffèrent. Ainsi pour $\mathbf{m}_i = (00110)$ $\mathbf{m}_j = (10010)$, $d\ (\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = 2$. Il est facile de vérifier que cette quantité a toutes les propriétés d'une distance. Elle va permettre de donner une procédure de décodage dans le cas d'utilisation d'un canal symétrique où la probabilité d'un caractère erroné $(p\ (0/1) = p\ (1/0))$ est inférieure à 0,5 (ce qui est logique, sinon il vaut mieux changer d'organe physique de transmission). Désignons par $\mathbf{y}$ le mot reçu qui doit être accordé avec un des mots possibles émis $\mathbf{m}_1 ... \mathbf{m}_m$. La règle de décision choisie est la règle classique du maximum de vraisemblance. $\mathbf{y}$ est associé au mot $\mathbf{x}_i$ si

$$\mathrm{P}\ (\mathbf{y}/\mathbf{x}_i) > \mathrm{P}\ (\mathbf{y}/\mathbf{x}_j)\ \forall \mathbf{x}_j \neq \mathbf{x}_i$$

Autrement dit, le mot $\mathbf{y}$ est associé au mot $\mathbf{x}_i$ pour lequel la probabilité d'obtention est la plus grande : c'est une règle logique. Après une courte suite de calculs, il est facile de montrer que, dans le cas des canaux précités, cette règle revient à associer le mot-code $\mathbf{x}_i$ pour lequel

$$d\ (\mathbf{y}, \mathbf{x}_i) < d\ (\mathbf{y}, \mathbf{x}_j)\ \forall \mathbf{x}_j \neq \mathbf{x}_i ;$$

il suffit donc de décoder $\mathbf{y}$ en $\mathbf{x}_i$, mot le plus proche de $\mathbf{y}$ au sens de la distance de Hamming.

Au moyen de cette distance, on peut effectuer une partition de $C + \bar{C}$ en régions $R_i$ distinctes, telles que si $\mathbf{y}$ tombe dans la région $R_i$ on lui associe le mot-code $m_i$. Notons $R_0$ l'ensemble des points se trouvant à égale distance de deux points $\mathbf{m}_i$, $\mathbf{m}_j$. $R_0$ est l'ensemble des points pour lesquels une décision immédiate est impossible. On a donc, pour un mot reçu $\mathbf{y}$, les cas possibles suivants :

$\mathbf{y} \in \bar{C}$ : le mot n'est pas un mot-code, on peut faire la détection d'erreurs ;

$\mathbf{y} \in R_i$ : on peut corriger l'erreur et décoder $\mathbf{y}$ en $x_i$ ;

$\mathbf{y} \in R_0$ : on peut détecter l'erreur mais on ne peut corriger ($R_0 \in \bar{C}$).

Prenons un exemple avec $n = 3$. L'ensemble $(C + \bar{C})$ est constitué de $m_1 = 000$, $m_2 = 001$, $m_3 = 010$, $m_4 = 011$, $m_5 = 100$, $m_6 = 101$, $m_7 = 110$, $m_8 = 111$. Choisissons pour mots-codes $Cm_1 = 000$ et $m_7 = 110$. En ce cas, il est facile de voir d'après la *figure* 7 que $R_1 = m_2, m_1$ $R_2 = m_7, m_8$ et $R_3 = m_3, m_5, m_4, m_6$. Il y a donc un grand ensemble de messages où on détecte une erreur sans la corriger. Sans calcul et par un simple raisonnement logique, on peut dire qu'on diminuera le risque d'erreur et qu'on augmentera la possibilité de correction en agrandissant la distance entre les mots-codes. On a d'ailleurs les deux résultats suivants : la condition nécessaire et suffisante pour qu'un code binaire permette la détection d'au plus $r$ erreurs est que la distance entre les mots-codes vérifie : $d\ (\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \geqslant 2r + 1$. De même, la condition nécessaire et suffisante pour qu'un code binaire permette la détection d'au moins $r$ erreurs (et en corrige $(r - 1)$) est que la distance entre les mots-codes vérifie $d\ (\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \geqslant 2r$.

### *Principe des codes à contrôle de parité*

Dans les raisonnements antérieurs, nous avons dit que, pour $2^n$ mots-codes possibles, $2^m$ étaient utilisés, donc que, sur les $n$ chiffres, $m$ étaient porteurs d'information. Les $(n - m)$ autres chiffres vont être utilisés en contrôle ; ce sont les « bits de parité ». Pour comprendre le mécanisme, introduisons l'addition modulo 2, $\oplus$

$$1 \oplus 1 = 0 \qquad 0 \oplus 1 = 1$$
$$1 \oplus 0 = 1 \qquad 0 \oplus 0 = 0$$

et créons un mot-erreur de même longueur $n$ que les mots-codes. Ce mot a un 1 en $i$-ième position si le $i$-ième chiffre du mot-code est erroné et un 0 aux positions où les chiffres du mot-code sont corrects. Soit donc $\mathbf{m}_i$ le mot-code émis et $\mathbf{m}'_i$ le mot reçu, $\mathbf{e}_i$ le mot-erreur correspondant :

$$\mathbf{m}'_i = \mathbf{m}_i \oplus \mathbf{e}_i$$

L'addition modulo 2 ci-dessus s'entend comme addition de chaque chiffre correspondant dans chaque vecteur.

Ainsi avec $n = 4$, si $\mathbf{m}_i = 1000$ $\mathbf{m}'_i = 1001$, le mot-erreur $\mathbf{e}_i$ vaut $\mathbf{e}_i = 0001$.

Nous allons constituer les mots-codes $\mathbf{m}_i$ à partir de la partie information de dimension $m$ de la façon suivante (codes à contrôle de parité) :

$m_i = u_i$ pour les chiffres 1 à $m$

$m_i = a_{1i}u_1 \oplus a_{2i}u_2 \oplus ... \oplus a_{mi}u_m$ pour les chiffres $m + 1$ à $n$. Les coefficients $a_{1i} ... a_{2i}$ sont fixés une fois pour toutes.

Supposons par exemple $m = 3$, $n = 6$ et définissons la transformation suivante :

$$m_1 = u_1 \qquad m_2 = u_2 \qquad m_3 = u_3$$
$$m_4 = u_4 + u_3 \qquad m_5 = u_1 + u_3 \qquad m_6 = u_1 + u_2$$

| Partie information | Mot-code |
|---|---|
| 000 | 000 000 |
| 001 | 001 110 |
| 010 | 010 101 |
| 011 | 011 011 |
| 100 | 100 011 |
| 101 | 101 101 |
| 110 | 110 110 |
| 111 | 111 000 |

Un tel code (une application de l'espace à $2^m$ éléments dans un espace à $2^n$ dimensions) est dit code systématique. Un code est dit non systématique si la séparation de la partie information et de la partie parité n'est pas nette. Pour un tel code, on a :

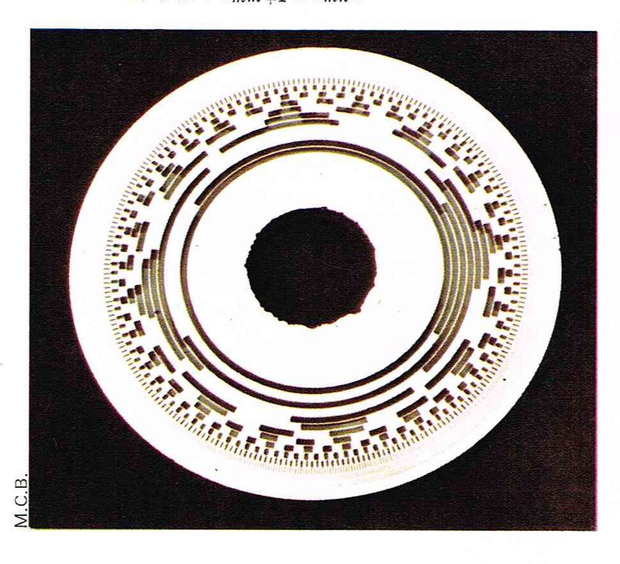
$$m_i = u_1a_{1i} \oplus u_2a_{2i} \oplus ... \oplus u_ma_{mi} \quad 1 \leqslant i \leqslant m.$$

En prenant une écriture matricielle, on définit la matrice génératrice G du code par la relation :

$$\mathbf{m} = \mathbf{u}\mathrm{G}.$$

Pour un code systématique, la matrice G peut s'écrire :

$$\mathrm{G} = \begin{bmatrix} 1\ 0 \ldots 0\ a_{1\,m+1} \ldots a_{1\,n} \\ 0\ 1 \ldots 0\ a_{2\,m+1} \ldots a_{2\,n} \\ , \quad , \qquad , \qquad , \\ 0\ 0 \ldots 1\ a_{mm+1} \ldots a_{mn} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{u} = [u_1 \ldots u_m]$$


M.C.B.

▶ ***Disque codé en code absolu comprenant 46 000 points.***

C'est donc une matrice à $m$ lignes et $n$ colonnes dont la connaissance permet de générer les mots-codes. Dans l'exemple ci-dessus, elle vaut :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Les remarques suivantes se déduisent facilement de ces notions :

— Si $\mathbf{u}_1$ et $\mathbf{u}_2$ sont deux séquences d'information dont les mots-codes sont $\mathbf{m}_1$ et $\mathbf{m}_2$, $\mathbf{m}_1 \oplus \mathbf{m}_2$ est un mot-code correspondant à $\mathbf{u}_1 \oplus \mathbf{u}_2$.

— Soit $\mathbf{u} = [0 \ldots 0\ 1\ 0 \ldots 0]$, le 1 étant en $i$-ième position, alors **m** est égal à la $i$-ième ligne de G. Les lignes de G forment donc une base de l'ensemble des mots-codes. En effectuant certaines transformations sur la matrice génératrice, on obtient la matrice de parité H.

Il est facile de vérifier qu'on a la relation :

$$\mathbf{m}\mathrm{H} = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{0} = [\underbrace{0 \ldots 0}_{n-m}]$$

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} a_{1\,m+1} & \ldots & a_{1\,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{mm+1} & \ldots & a_{mn} \\ 1\ 0 & & 0 \\ 0\ 1 & \ldots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice est parfois appelée matrice de contrôle, car elle permet de voir si un mot est un mot-code (le produit par H doit donner une matrice ligne nulle). Par exemple, pour le même code que précédemment :

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Prenons $\mathbf{m} = [110110]$

$$\mathbf{m}\ \mathrm{H} = [000]$$

L'utilisation des matrices H va permettre la détection et la correction éventuelle des erreurs de transmission. En effet, soit **m** le mot-code émis, **y** le mot reçu. Deux cas se présentent : soit $\mathbf{y}\mathrm{H} = \mathbf{0}$, auquel cas aucune erreur ne peut être détectée (le mot appartient au code), soit $\mathbf{y}\mathrm{H} \neq \mathbf{0}$, auquel cas le mot reçu est erroné, et on s'en aperçoit. D'autre part,

$$(\mathbf{y} \oplus \mathbf{m})\ \mathrm{H} = \mathbf{y}\mathrm{H} = \mathrm{S}$$

S est appelée matrice syndrome. Or $(\mathbf{y} \oplus \mathbf{m})$ est un mot contenant un « 1 » aux positions où **y** et **m** diffèrent. Soit **e** cette séquence qui est en fait ce que nous avions appelé mot-erreur. Nous avons donc : $\mathbf{e}\mathrm{H} = \mathrm{S}$.

Pour appliquer la règle de décodage du maximum de vraisemblance, il faut rechercher le mot-code **m** le plus proche de **y** au sens de la distance de Hamming, c'est-à-dire rechercher le mot-erreur **e** de poids le plus faible qui redonne S.

D'où la technique de décodage :

— constituer la table des valeurs possibles de S (il y en a $2^{n-m}$) à partir des séquences erreurs( commencer par la séquence erreur de poids le plus faible) ;

— soit **y** le mot reçu, calculer $\mathbf{y}\mathrm{H} = \mathrm{S}$ ;

— rechercher dans la table la séquence erreur **e** correspondant à S et décoder **y** en $\mathbf{m} = \mathbf{y} \oplus \mathbf{e}$.

Cette technique de décodage demande donc la constitution d'une table qu'on consultera dès réception d'un mot-code.

Prenons comme exemple le code ($n = 6$, $m = 3$) dont nous avons donné la matrice génératrice et la matrice de parité. Dans un premier temps, constituons la matrice syndrome S pour chaque séquence erreur possible.

| Séquence erreur **e** | eH = HS |
|---|---|
| 000 000 | 000 |
| 100 000 | 011 |
| 010 000 | 101 |
| 001 000 | 110 |
| 000 100 | 100 |
| 000 010 | 010 |
| 000 001 | 001 |

Nous avons aussi couvert l'absence d'erreur (première séquence) et toutes les erreurs simples (un chiffre erroné), mais la table de syndrome n'est pas complète, puisqu'elle doit comporter $2^{n-m}$ séquences. Il faut donc rechercher la séquence erreur de poids minimal (donc, dans notre cas, au moins 2) qui réalise le syndrome manquant 111. Par essais successifs, on trouve 100 100 :

$$((100\ 100) \cdot \mathrm{H} = 111).$$

Il n'y a pas une seule séquence erreur de poids 2 donnant ce syndrome de 111 (par exemple 010 010), mais on est obligé de faire un choix arbitraire. Supposons maintenant que le mot reçu soit $\mathbf{y} = (010\ 011)$, $\mathbf{y}\mathrm{H} = 110$, donc **y** est erroné, ce n'est pas un mot-code. La séquence erreur correspondant au syndrome 110 est 001 000 (chiffre n° 3 erroné), on peut rétablir le mot émis par :

$$\mathbf{m} = \mathbf{y} \oplus \mathbf{e} = (010\ 011) \oplus (001\ 000) = 011\ 011$$

L'information transmise est donc 011 puisque nous avions un code systématique.

D'une façon générale, on notera $(n, m)$ un code de longueur de mots $n$, dont la partie information a pour longueur $m$ (application de l'espace de dimension $2^m$ dans l'espace de dimension $2^n$).

### *Les codes de Hamming*

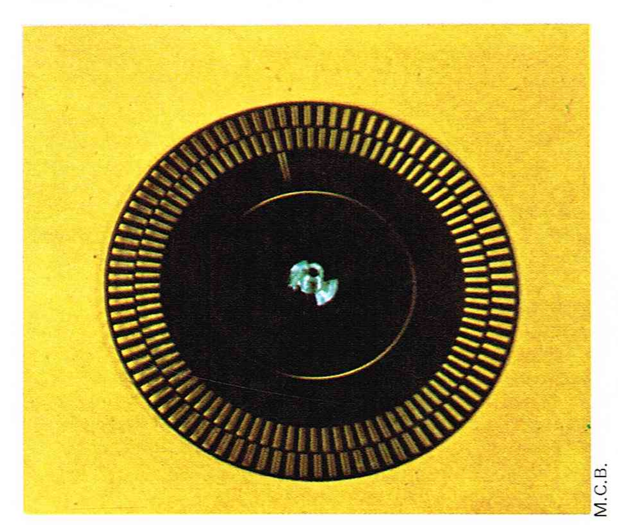
Si on admet uniquement la possibilité de correction d'erreur simple, on doit avoir $2^{n-m} \geqslant n + 1$. Le nombre de syndromes doit être au moins égal à la somme du nombre de séquences erreurs de poids 1 et de la séquence correspondant à une transmission correcte. Les codes pour lesquels on a égalité sont des codes à redondance minimale appelés aussi codes de Hamming. Par exemple :

| $n - m$ | $n$ | $m$ | code |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | (1, 0) |
| 2 | 3 | 1 | (3, 1) |
| 3 | 7 | 4 | (7, 4) |
| 4 | 15 | 11 | (15, 11) |
| 5 | 31 | 26 | (31, 26) |

Ces codes détectent et corrigent les erreurs simples. L'organe de codage peut être réalisé avec des circuits simples : registre à décalage ET (OU) exclusifs (additionneur modulo 2) [*fig.* 8], ces derniers opérant l'élaboration des chiffres de parité.

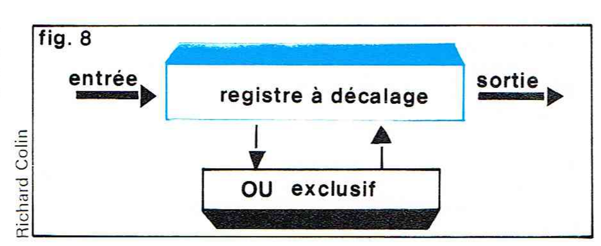
De même pour l'opération de décodage. A titre d'exemple, examinons le code de Hamming (7, 4) dans lequel 3 chiffres sont consacrés au contrôle. Le mot-code est $[c_1\ c_2\ a_3\ c_4\ a_5\ a_6\ a_7]$ où $c_1\ c_2\ c_4$ sont les chiffres de contrôle donnés par les équations :

$$c_1 = a_3 \oplus a_5 \oplus a_7 \quad c_2 = a_3 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$c_4 = a_5 \oplus a_6 \oplus a_7$$


M.C.B.

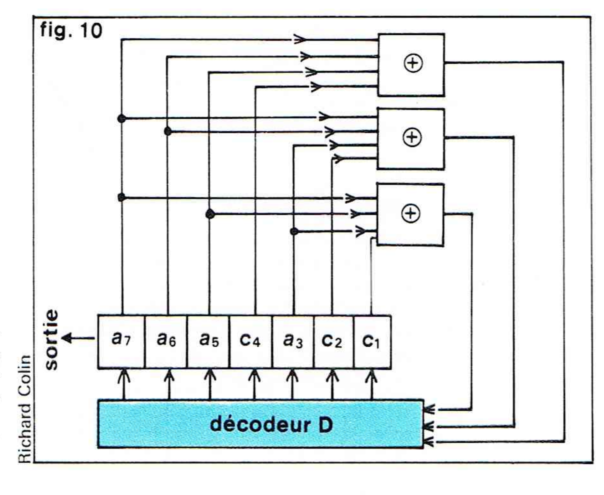
◀ ***Disque codé incrémental à 2 pistes, 1 top permettant la remise à 0 du compteur d'impulsions, et 100 points.***

▶ *Figure 8 : organe de codage utilisant un registre à décalage et des portes* OU *exclusif.*




▶ *Figure 9 : circuit utilisant un registre à décalage et servant au codage d'un code de Hamming (7,4). La partie information est* $[a_7, a_6, a_5, a_3]$.

▶ *Figure 10 : circuit utilisant un registre à décalage servant au décodage d'un code de Hamming (7, 4) [partie information du mot* $a_7a_6a_5a_3$*].*




Le lecteur pourra retrouver les matrices génératrices et de parité. Le codage peut être réalisé par le circuit de la *figure* 9 à l'aide d'un registre à décalage.

Au décodage, on élabore le contrôle des chiffres par :

$$z_1 = c_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$z_2 = c_2 \oplus a_3 \oplus a_6 \oplus a_7$$
$$z_3 = c_1 \oplus a_3 \oplus a_5 \oplus a_7$$

Si $(z_1\, z_2\, z_3) = (0, 0, 0)$, il n'y a pas d'erreur. S'il y a une erreur, le mot formé (7 possibilités) peut être mis en correspondance directe avec le chiffre erroné. Notons que, dans le cas très simple du code proposé, calculer **y**H (**y** mot reçu) revient à exprimer les chiffres du syndrome en fonction directe des autres chiffres. Le circuit de décodage est alors représenté par la *figure* 10. Le décodeur D associe à la séquence $(z_1\, z_2\, z_3)$ le chiffre erroné. Les symboles d'information sont séparés par des circuits portes — qu'on n'a pas représentés — qui s'ouvrent au moment où ces symboles apparaissent à la sortie : c'est l'inconvénient d'avoir pris un code non systématique.

### *Codes cycliques*

Les codes cycliques forment un sous-ensemble des codes détecteurs-correcteurs d'erreurs. La construction de ces codes et leur utilisation sont très faciles grâce à l'algèbre des polynômes.

#### Rappels d'algèbre

Nous nous limiterons aussi dans cette partie aux codes élaborés à partir de l'alphabet binaire. Considérons donc l'espace formé de 2 éléments $\{0, 1\}$ qu'on munit de deux opérations : « OU exclusif » et « ET ». La première opération




a déjà été définie, la seconde est caractérisée par la table de vérité suivante :

| | 0 | 1 |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |

Muni de ces opérations, on obtient une structure de corps. Le nombre d'éléments étant fini, le corps est appelé **corps de Galois** et sera noté GF (2) (en anglais, « Galois Field »). Une expression du type :

$$a_n x^n \oplus a_n x^{n-1} \oplus \ldots \oplus a_0$$

est appelée polynôme de degré $n$ sur GF (2) si les $a_i$ sont des éléments de GF (2), $(a_n \neq 0)$, $x$ est appelé une indéterminée : il ne doit pas être interprété comme une variable ou un élément inconnu du corps, car en fait c'est la suite $[a_n, \ldots, a_0]$ qui va nous intéresser, le polynôme n'étant qu'une aide à la construction du code. Deux polynômes sont dits égaux s'ils correspondent tous deux à la même suite de coefficients. Ainsi, d'après notre définition,

$$P_1(x) = x^3 \oplus x^2 \oplus x \quad \text{et} \quad P_2(x) = x$$

sont deux polynômes différents et pourtant $P_1(1) = P_2(1)$, de même $P_1(0) = P_2(0)$. Sur l'ensemble des polynômes, on peut définir la somme :

$$P_1(x) \oplus P_2(x) = \sum_i (a_{1i} \oplus a_{2i})\, x^i$$

Par exemple, $(x^2 \oplus x \oplus 1) \oplus (x^2 \oplus 1) = x$, la multiplication par un scalaire et la multiplication de deux polynômes :

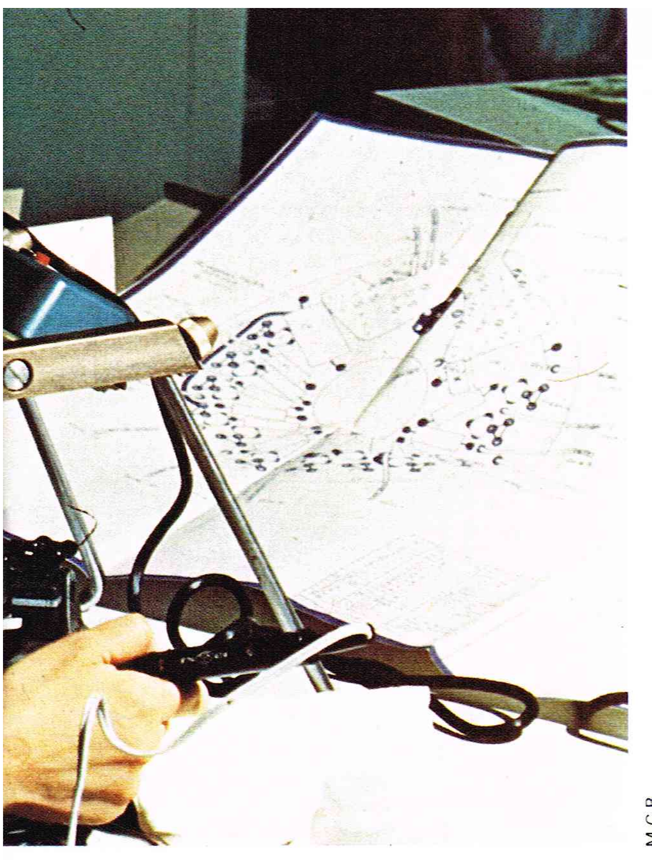
$$P_1(x)\, P_2(x) = \sum_{ij} (a_{1i}\, a_{2j-i})\, x^i$$

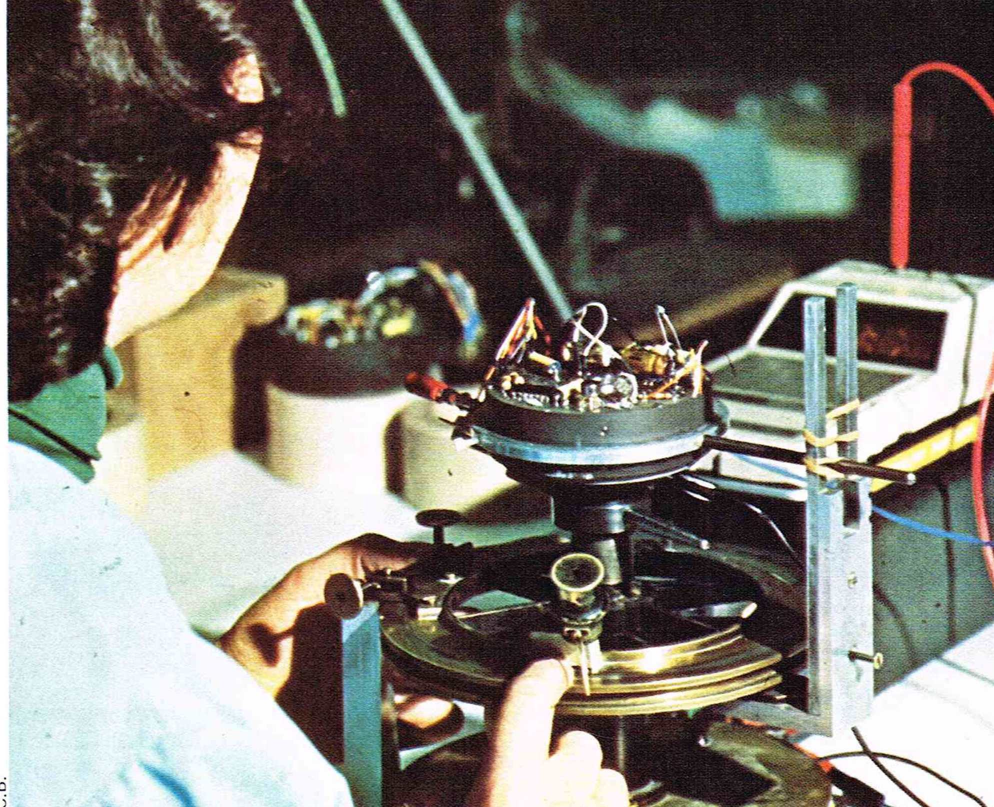
Muni de l'addition, l'ensemble des polynômes définis sur GF (2) forme un groupe abélien, mais ce n'est pas un groupe si on le munit de la multiplication. La structure algébrique créée par cet ensemble est un anneau.

Soit maintenant deux polynômes $P_1(x)$, $P_2(x)$ définis sur GF (2) ($P_2(x)$ de degré minimal 1) ; alors il existe deux polynômes $q(x)$ et $r(x)$ tels que :

$$P_1(x) = q(x)\, P_2(x) \oplus r(x)$$

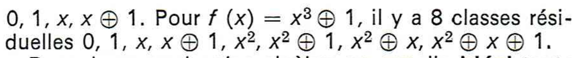
Le degré de $r(x)$ est inférieur à celui de $P_2(x)$. Cette opération, la **division euclidienne,** permet de définir une relation d'équivalence : deux polynômes sont dits équivalents modulo $f(x)$ si le reste de leur division par $f(x)$ est identique. Cette règle permet de partager l'ensemble des polynômes en classes résiduelles modulo $f(x)$. Chaque classe peut être représentée par son terme de plus bas degré. Pour un polynôme $f(x)$ de degré N, il y a $2^N$ classes résiduelles. Par exemple, prenons comme polynôme $f(x) : x^2 \oplus 1$. Il y a 4 classes résiduelles,





M.C.B.

▲ ***A gauche, soudure et contrôle du circuit imprimé incorporé dans un codeur destiné au traitement de l'information; on peut observer le plan agrandi du circuit imprimé à droite de l'ouvrière. A droite, contrôle du couple optique d'un codeur angulaire.***



$0, 1, x, x \oplus 1$. Pour $f(x) = x^3 \oplus 1$, il y a 8 classes résiduelles $0, 1, x, x \oplus 1, x^2, x^2 \oplus 1, x^2 \oplus x, x^2 \oplus x \oplus 1$.

Rappelons aussi qu'en algèbre on appelle **idéal** toute partie d'un anneau fermée pour l'addition et la multiplication. L'ensemble des multiples d'un élément est un idéal particulier dit idéal principal.

Considérons donc l'ensemble des polynômes $P(x)$ et l'ensemble des classes résiduelles $Ig(x)$, reste des divisions par $g(x)$. Dans $Ig(x)$, chaque idéal est engendré par le polynôme de plus bas degré $f(x)$ : cet élément est unique et divise $g(x)$. Réciproquement, tout diviseur de $g(x)$ engendre un idéal. Donc la condition pour qu'une classe appartienne à un idéal est qu'elle soit divisible par le polynôme générateur de cet idéal.

Par exemple, soit $g(x) = x^3 \oplus 1$. Ce polynôme se décompose en produit du polynôme $x \oplus 1$ par le polynôme $x^2 \oplus x \oplus 1$ et il y a 8 classes résiduelles

$$(0, 1, x, x \oplus 1, x^2, x^2 \oplus 1, x^2 \oplus x, x^2 \oplus x \oplus 1).$$

Dans ces 8 classes, il y a deux idéaux, le premier formé par les multiples de $x \oplus 1$ $(0, x \oplus 1, x^2 \oplus x)$, l'autre formé par les multiples de $x^2 \oplus x \oplus 1$ $(0, x^2 \oplus x \oplus 1)$.

Nous terminerons ces rappels d'algèbre par la notion d'**irréductibilité.** On dit qu'un polynôme $P(x)$ est réductible sur un corps s'il existe deux polynômes $g(x)$ et $h(x)$ tels que $P(x) = g(x)\,h(x)$. Dans le cas contraire, on dit que le polynôme est irréductible. Notons que l'irréductibilité est liée au corps; ainsi $x^2 \oplus 1$ est irréductible sur le corps des réels mais est réductible sur le corps des complexes. Un élément est dit racine d'un polynôme $P(x)$ si $P(x) = (x \oplus \alpha)\,Q(x)$. Ainsi 1 est racine de $x^2 \oplus 1$, car $x^2 \oplus 1 = (x \oplus 1)(x \oplus 1)$.

Ces différentes notions vont nous permettre de construire les codes cycliques.

### Définition du code cyclique

Les codes cycliques forment une classe particulière des codes linéaires, encore appelés codes de groupe. Un code cyclique C de taille $n$ et de longueur de mot N est un code linéaire fermé pour la permutation linéaire des chiffres. Ainsi, si $(a_{N-1} \ldots a_1 a_0)$ est un mot-code, $(a_{N-2} \ldots a_1 a_0 a_{N-1})$, $(a_{N-3} \ldots a_1 a_0 a_{N-1} a_{N-2})$, etc., le sont aussi. Jusqu'à présent, nous avions adopté une représentation matricielle des mots-codes, nous allons maintenant utiliser la notion de polynôme précédemment définie sur GF (2). A tout mot-code, on associe le polynôme construit sur GF (2) de la manière suivante :

$$\text{mot-code} : a_{N-1}\, a_{N-2} \ldots a_0 = \mathbf{u}$$

polynôme associé $u(x) = a_{N-1} x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_0$.

Dans la suite du texte, lorsqu'il n'y aura pas d'ambiguïté, nous désignerons le mot-code aussi bien par la matrice $\mathbf{u}$ que par le polynôme associé $u(x)$.

Étudions le produit : $x \cdot u(x)$

$$x\,(a_{N-1} x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_0) = a_{N-1} x^N \oplus a_{N-2} x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_0 x$$
$$= a_{N-1}\,(x^N \oplus 1) \oplus a_{N-2}\, x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_{N-1}$$

Donc $x\,(a_{N-1}\, x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_0)$ est équivalent à

$(a_{N-2}\, x^{N-1} \oplus \ldots \oplus a_0 x \oplus a_{N-1})$ modulo $(x^N \oplus 1)$.

Multiplier par $x$ le polynôme équivalent d'un mot-code permet d'obtenir, modulo $(x^N \oplus 1)$, un polynôme associé à un autre mot-code, celui obtenu après une première permutation sur $\mathbf{u}$. De même $x^i u(x)$ modulo $(x^N \oplus 1)$ est un polynôme correspondant au $i$-ième permuté de $\mathbf{u}$, donc à un mot-code.

Soit $C(x)$ l'ensemble des polynômes associés à un mot-code cyclique C. Si $\mathbf{u}_1$ et $\mathbf{u}_2$ sont deux mots-codes, $C(x)$ contient $u_1(x) \oplus u_2(x)$. Si $\mathbf{u}$ est mot-code, $C(x)$ contient $x^i u(x)$ modulo $(x^N \oplus 1)$. Donc $C(x)$ contient toute somme du type $\sum_k c_k x^k u(x)$ (modulo $(x^N \oplus 1)$).

$C(x)$ est ainsi fermé pour l'addition et la multiplication par un scalaire : il correspond à la définition que nous avions associée à la notion d'idéal. Donc, d'après ce qui a été vu au paragraphe précédent, il existe un polynôme de plus bas degré qui engendre cet idéal; de plus, ce polynôme est un diviseur de $x^N \oplus 1$. Soit $u_0(x)$ ce polynôme, $m$ son degré, on l'appelle le polynôme générateur du code. $u_0(x)$ divise aussi de par la notion d'idéal chaque polynôme $u(x)$ de $C(x)$; $u(x)$ étant de degré N, il y a $2^{N-m}$ quotients possibles, donc $C(x)$ est de dimension $2^{N-m}$. Un code cyclique de taille de mots N caractérisé par un polynôme $u_0(x)$ de degré $m$ est donc un code dont la partie information comprend $N - m$ chiffres : on note $(N, N - m)$ un tel code. Pour ces codes, on peut retrouver facilement les notions de matrice génératrice et de matrice de parité : les codes cycliques ne sont en effet que des cas particuliers des codes à contrôle de parité.

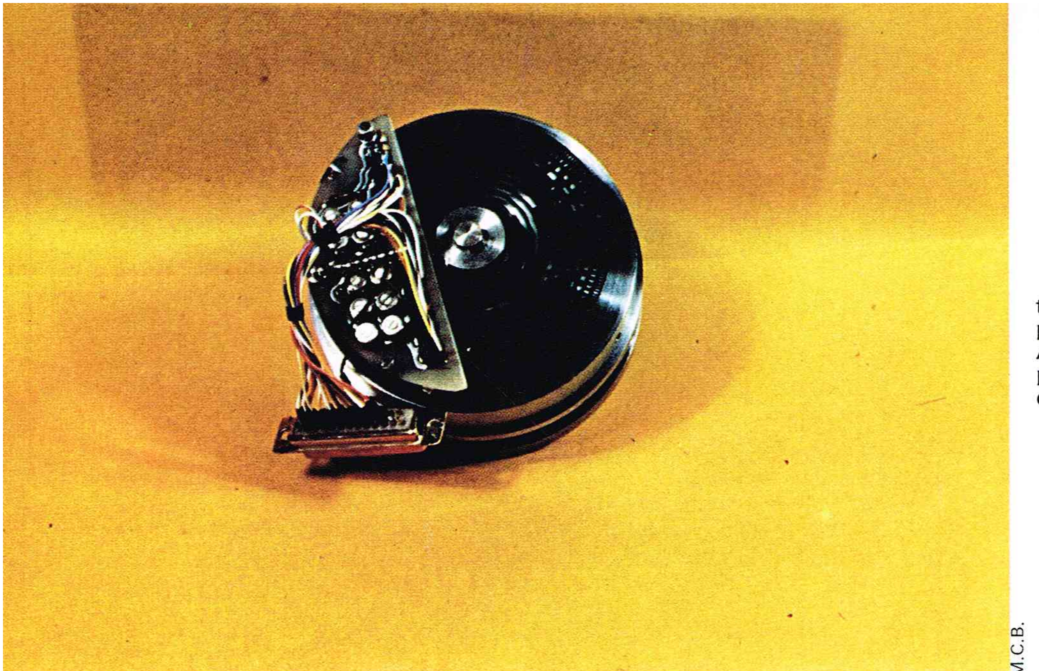
Définissons $u_0(x)$ par un mot de taille N constitué de ses coefficients :

$$\underbrace{0\,0 \ldots 0\, a_m \ldots a_0}_{N}$$

Il est facile de montrer que $\mathbf{u}_0$ et ses $(N - m - 1)$ permutés circulaires forment une base du code : on élabore alors facilement la matrice génératrice G

$$G = \underbrace{\begin{bmatrix} a_m\, a_{m-1} \ldots a_0\, 0 \ldots 0 \\ 0\, a_m \ldots a_1\, a_0\, 0 \ldots 0 \\ 0 \,.\,.\,.\,.\,.\, 0\, a_m \ldots a_0 \end{bmatrix}}_{N} \left.\vphantom{\begin{bmatrix} a \\ a \\ a \end{bmatrix}}\right\} N - m$$

Si $x$ est la partie information, le mot-code $\mathbf{u}$ s'élabore par $\mathbf{u} = x\mathrm{G}$. Cette méthode revient à multiplier la partie



M.C.B.

▲ *Écorché d'un codeur optique permettant d'observer le circuit électronique et le disque codé.*

information par le polynôme générateur. Considérons le code (7, 4) engendré par $u_0(x) = x^3 \oplus x \oplus 1$.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour définir la matrice de parité, il est nécessaire de définir le polynôme orthogonal d'un code cyclique. $\overline{u_0(x)}$ est dit orthogonal au polynôme générateur $u_0(x)$ du code cyclique si

$$u_0(x)\,\overline{u_0(x)} = 0 \text{ modulo } (x^N \oplus 1).$$

▼ *Tableau I : génération des mots-codes par division [cas de l'exemple du code (7, 4)].*

Ce polynôme est donc de degré $(N - m)$

$$\overline{u_0(x)} = \overline{a}_{N-m}\, x^{N-m} \oplus \ldots \oplus \overline{a}_0$$

$u(x)$ étant un mot-code

**Tableau I**

**Génération des mots-code par division [exemple du code (7, 4)]**

| $i$ | $i(x)$ | $t(x)$ = reste de la division de $i(x)$ par $u_0(x)$ $(x^3 \oplus x \oplus 1)$ | mot-code |
|---|---|---|---|
| 0000 | $0$ | $0$ | 0000 000 |
| 0001 | $x^3$ | $x \oplus 1$ | 0001 011 |
| 0010 | $x^4$ | $x^2 \oplus x$ | 0010 110 |
| 0011 | $x^4 \oplus x^3$ | $x^2 \oplus 1$ | 0011 101 |
| 0100 | $x^5$ | $x^2 \oplus x \oplus 1$ | 0100 111 |
| 0101 | $x^5 \oplus x^3$ | $x^2$ | 0101 100 |
| 0110 | $x^5 \oplus x^4$ | $1$ | 0110 001 |
| 0111 | $x^5 \oplus x^4 \oplus x^3$ | $x$ | 0111 010 |
| 1000 | $x^6$ | $x^2 \oplus 1$ | 1000 101 |
| 1001 | $x^6 \oplus x^3$ | $x^2 \oplus x$ | 1001 110 |
| 1010 | $x^6 \oplus x^4$ | $x \oplus 1$ | 1010 011 |
| 1011 | $x^6 \oplus x^4 \oplus x^3$ | $0$ | 1011 000 |
| 1100 | $x^6 \oplus x^5$ | $x$ | 1100 010 |
| 1101 | $x^6 \oplus x^5 \oplus x^3$ | $1$ | 1101 001 |
| 1110 | $x^6 \oplus x^5 \oplus x^4$ | $x^2$ | 1110 100 |
| 1111 | $x^6 \oplus x^5 \oplus x^4 \oplus x^3$ | $x^2 \oplus x \oplus 1$ | 1111 111 |

$$\begin{aligned} u(x) &= u_0(x)\,Q(x) \\ u(x)\,\overline{u_0}(x) &= u_0(x)\,\overline{u_0(x)}\,Q(x) \\ &= (x^N \oplus 1)\,Q(x) \end{aligned}$$

Donc $x^N \oplus 1$ divise le produit $u(x)\,\overline{u_0(x)}$. Une condition pour que $u(x)$ soit un mot-code est que son produit par le polynôme orthogonal soit divisible par $(x^N \oplus 1)$. A partir de là, il est facile de montrer que la matrice de parité H telle que **u**H = 0 peut s'écrire avec les coefficients du polynôme orthogonal :

$$H = \underbrace{\begin{bmatrix} \overline{a}_0 & 0 \;\ldots & 0 \\ \overline{a}_1 & \overline{a}_0 & \text{«} \\ \text{«} & \text{«} & \text{«} \\ \overline{a}_{N-m} & \text{«} & \text{«} \\ 0 & \overline{a}_{N-m} & \overline{a}_0 \\ \text{«} & 0 & \text{«} \\ 0 & \text{«} & \overline{a}_{N-m} \end{bmatrix}}_{m} \left.\vphantom{\begin{bmatrix} a\\a\\a\\a\\a\\a\\a \end{bmatrix}}\right\} N - m$$

Recherchons la matrice de parité du code (7, 4) généré par

$$u_0(x) = x^3 \oplus x \oplus 1.$$

Pour cela, divisons $x^7 \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$ :

| $x^7 \oplus 1$ | $x^3 \oplus x \oplus 1$ |
|---|---|
| $x^7 \oplus x^5 \oplus x^4$ | $x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$ |
| $x^5 \oplus x^4 \oplus 1$ | |
| $x^5 \oplus x^3 \oplus x^2$ | |
| $x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$ | |
| $x^4 \oplus x^2 \oplus x$ | |
| $x^3 \oplus x \oplus 1$ | |
| $x^3 \oplus x \oplus 1$ | |
| $0$ | |

$\overline{u_0}(x)$ s'écrit donc $x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$

et la matrice H

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir d'un code cyclique généré par $u_0(x)$, on peut définir le code orthogonal $\overline{\Gamma}$ qui a même longueur de mot, mais est généré par le polynôme orthogonal à $u_0(x)$, $\overline{u_0(x)}$. $\overline{\Gamma}$ est donc un code $(N, m)$.

Ces définitions nous donnent deux méthodes de génération des mots-codes. La première est la **génération par division.** On peut séparer dans un mot-code **u** la partie information **i** de la partie parité **p**. Dans le cas de la simple concaténation des deux, on a :

$$u(x) = i(x) \oplus p(x)$$

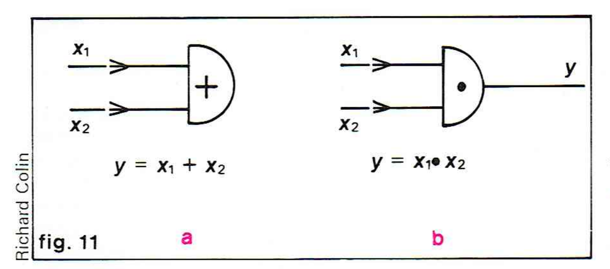
où $i(x)$ est le polynôme correspondant à **i** cadré en partie haute de **u**, $p(x)$ le polynôme correspondant à **p** cadré en partie basse :

$$u(x) = \underbrace{i_{N-1}\,x^{N-1} \oplus \ldots \oplus i_m\,x^m}_{i(x)} \oplus \underbrace{p_{m-1}\,x^{m-1} \oplus \ldots \oplus p_0}_{p(x)}$$

Comme $u(x)$ est un mot-code

$$\begin{aligned} u(x) &= u_0(x)\,Q(x) \\ u(x) \oplus p(x) &= u_0(x)\,Q(x) \\ i(x) &= u_0(x)\,Q(x) \oplus p(x) \end{aligned}$$

La partie parité correspond donc au polynôme reste de la division du polynôme associé à la partie information cadrée en degré $(N - 1)$ par le polynôme générateur $u_0(x)$. Reprenons l'exemple du code (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$ et générons par cette méthode les mots-codes (*tableau* I).




Cette méthode de génération est très facile, on verra de plus que l'implémentation par des circuits électroniques est aisée. Une deuxième méthode de génération est la **méthode de multiplication** par $g(x)$. En effet, tout mot-code est un multiple de $u_0(x)$ : il suffit donc d'écrire le polynôme $i(x)$ correspondant à la partie information i cadrée en bas et d'opérer la multiplication par $u_0(x)$ pour obtenir $u(x)$.

**Réalisation du codage**

Nous ne développerons dans cette partie que les réalisations à partir de circuits électroniques, mais on peut opérer aussi des réalisations entièrement informatiques à partir de logiciels. Les symboles 0 et 1 des codes binaires sont attribués conventionnellement aux niveaux de tension. (Deux conventions sont possibles : la convention 1 où « 0 » est attribué au potentiel minimal, « 1 » au potentiel maximal, la convention 2 où la spécification précédente est inversée.) Enfin les circuits de commutation peuvent être synchrones ou asynchrones selon que la commutation se fait à des temps bien déterminés marqués par un générateur de synchronisation ou bien à des temps arbitraires déterminés par les signaux qui sont appliqués à l'entrée. Nous présenterons symboliquement des circuits « OU » et des circuits « ET » comme le montre la *figure* 11. L'opérateur « OU exclusif » est en fait réalisé à partir de circuits « OU » et « ET ».

$$x_1 \oplus x_2 = (x_1 \cdot \bar{x}_2) + (x_2 \cdot \bar{x}_1).$$

L'opérateur « NON » est celui qui associe à la variable la variable complémentée (*fig.* 12).

Autre organe de base, le **circuit à bascule ou « trigger »** : c'est un circuit de commutation séquentielle à deux états stables qu'on associe au « 0 » et au « 1 ». On peut associer plusieurs bascules et portes pour réaliser un circuit à décalage. Ces circuits sont des dispositifs synchrones qui permettent de mémoriser les séquences de symboles et de les déplacer à raison d'une position par impulsion appliquée. Il y a quelques années, on réalisait des registres à décalage en câblant des ensembles de bascules et de portes, mais actuellement, grâce au développement des circuits intégrés, le registre à décalage est devenu un circuit de base. Nous avons besoin pour le codage de circuits réalisant la multiplication ou la division de deux polynômes équivalents aux séquences binaires. Le schéma bloc du circuit de la multiplication du polynôme $g_n x^n + ... + g_0$ par un polynôme de degré $m$ $u_0(x) = a_m x^m + ... + a_0$ est donné à la *figure* 13. A l'entrée, le signal appliqué est $g_n$ à la première impulsion de rythme, $g_{n-1}$ à la suivante, et ainsi de suite. Ce circuit est donc fondé sur le fait que la multiplication par $x$ correspond à une avance d'une impulsion de rythme. Le nombre d'impulsions de rythme nécessaire pour obtenir le résultat est égal à $(n + m + 1)$.

Pour bien comprendre le fonctionnement logique, réalisons la multiplication de $x^4 \oplus x \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$. Le circuit et la table d'évolution des états du circuit sont donnés par la *figure* 14.

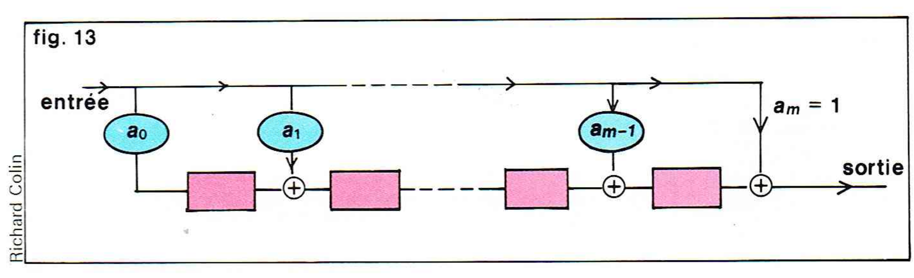
On retrouve bien

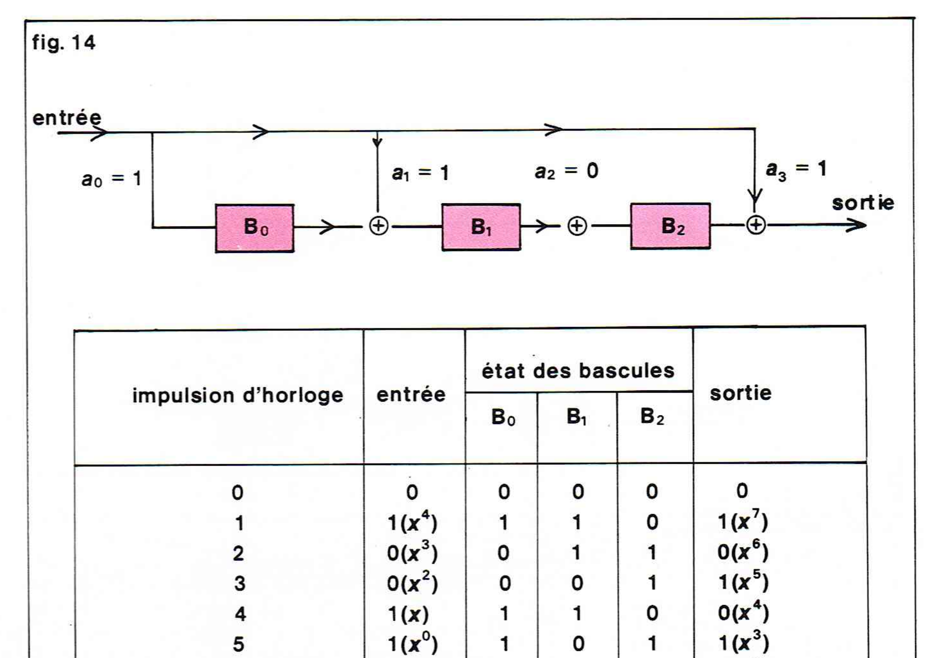
$$(x^4 \oplus x \oplus 1)\ (x^3 \oplus x \oplus 1) = x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1.$$

Le circuit réalisant la division de deux polynômes est fondé sur le même principe (*figure* 15).

Le nombre d'impulsions de rythme pour réaliser l'opération est égal au degré du dividende plus un. Soit à réaliser la division de $(x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1)$ par $(x^3 \oplus x \oplus 1)$. Le circuit et la table d'évolution sont donnés par la *figure* 16.

On retrouve bien $x^4 \oplus x \oplus 1$. A noter que l'état des bascules $B_0$, $B_1$, $B_2$ représente les coefficients, reste de la division (dans notre exemple, ce reste est nul).

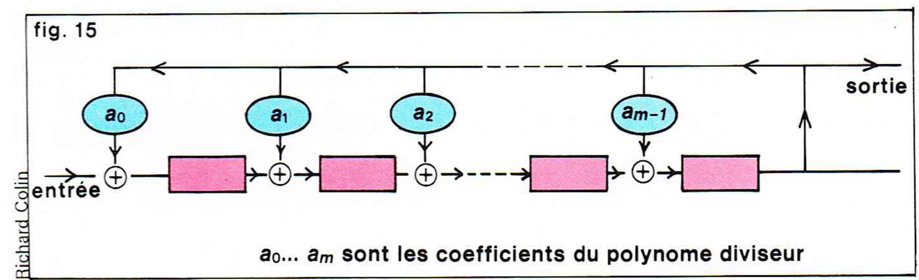


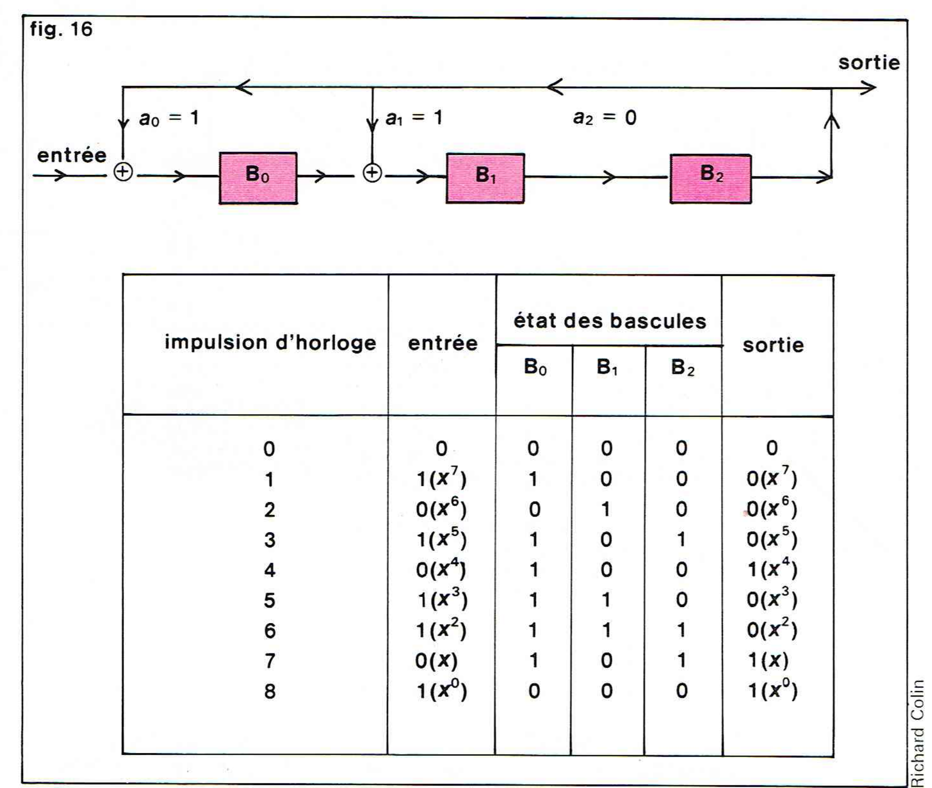




| impulsion d'horloge | entrée | état des bascules B0 | B1 | B2 | sortie |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | $1(x^4)$ | 1 | 1 | 0 | $1(x^7)$ |
| 2 | $0(x^3)$ | 0 | 1 | 1 | $0(x^6)$ |
| 3 | $0(x^2)$ | 0 | 0 | 1 | $1(x^5)$ |
| 4 | $1(x)$ | 1 | 1 | 0 | $0(x^4)$ |
| 5 | $1(x^0)$ | 1 | 0 | 1 | $1(x^3)$ |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | $1(x^2)$ |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 1 | $0(x)$ |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | $1(x^0)$ |

▲ ***Figure 11 : circuits de commutation :*** a) ***circuit*** **OU** ; b) ***circuit*** **ET.**
***Figure 12 : circuits de commutation :*** a) ***circuit*** **NON** ; b) ***circuit*** **OU *exclusif dont on donne la réalisation équivalente en*** **NON, OU** ***et*** **ET.**
***Figure 13 : circuit réalisant la multiplication d'un polynôme par le polynôme de degré m,*** $u_0(x) = a_m x^m \oplus ... \oplus a_0$.
***Figure 14 : exemple de fonctionnement du circuit précédent : multiplication de*** $x^4 \oplus x \oplus 1$ ***par*** $x^3 \oplus x \oplus 1$***, et évolution des états de ce circuit.***

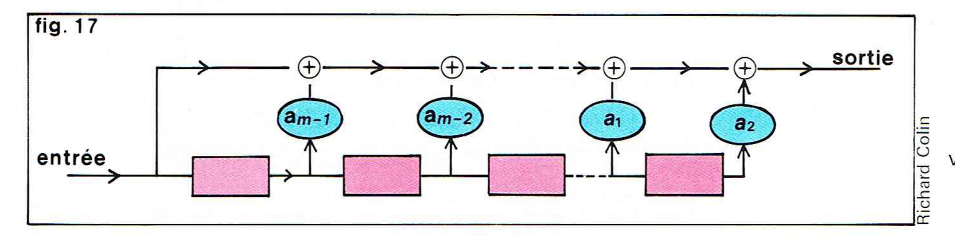
▼ *Figure 15 : circuit permettant la division de deux polynômes.*



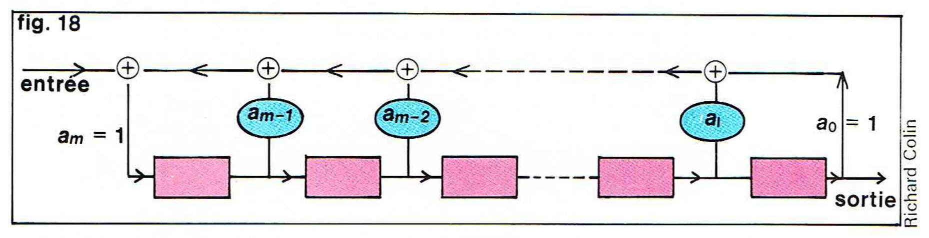



| impulsion d'horloge | entrée | état des bascules | | | sortie |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $B_0$ | $B_1$ | $B_2$ | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | $1(x^7)$ | 1 | 0 | 0 | $0(x^7)$ |
| 2 | $0(x^6)$ | 0 | 1 | 0 | $0(x^6)$ |
| 3 | $1(x^5)$ | 1 | 0 | 1 | $0(x^5)$ |
| 4 | $0(x^4)$ | 1 | 0 | 0 | $1(x^4)$ |
| 5 | $1(x^3)$ | 1 | 1 | 0 | $0(x^3)$ |
| 6 | $1(x^2)$ | 1 | 1 | 1 | $0(x^2)$ |
| 7 | $0(x)$ | 1 | 0 | 1 | $1(x)$ |
| 8 | $1(x^0)$ | 0 | 0 | 0 | $1(x^0)$ |

Richard Colin

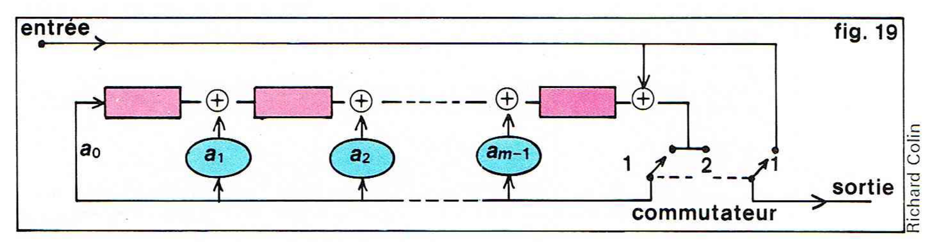



Richard Colin

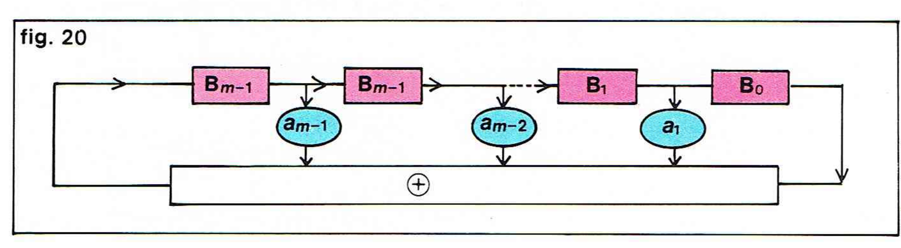



Richard Colin

▲ ***Figure 16 ; exemple de fonctionnement du circuit de la figure 15 : division de $x^7 \oplus x^5 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$ par $x^3 \oplus x \oplus 1$ et table d'évolution des états de ce circuit. Figure 17 : autre version d'un circuit de multiplication. Figure 18 : autre version d'un circuit de division.***




Richard Colin




Richard Colin

On peut proposer une autre version d'un circuit de multiplication par $a_m x^m \oplus ... \oplus a_0$ : *figure* 17 ; et d'un circuit de division par le même polynôme : *figure* 18.

A partir de ces deux types de schéma, il est facile de réaliser le codage par multiplication ou par division d'un code cyclique. Les coefficients $a_m ... a_0$ des circuits précédents sont ceux du polynôme générateur du code. Dans le cas de l'utilisation d'un circuit à multiplication, la partie information (mise en entrée) est considérée comme un polynôme de degré $(N - m - 1)$ ; on obtient après multiplication par $u_0(x)$ de degré $m$ un polynôme de degré $(N - 1)$ correspondant au mot-code de longueur $N - 1$. Dans le mot obtenu, les mots d'information et ceux de parité apparaissent par l'intermédiaire de combinaisons linéaires ; le code n'est pas, dans ce cas, systématique. Au contraire, si on opère par division, on a un code systématique, comme le montre la *figure* 19.

Le commutateur étant dans la position 1, la sortie est constituée de la succession des coefficients de $x^m i(x)$ ($i(x)$ polynôme de degré $(N - m - 1)$ correspondant à la partie information), ce qui correspond aux chiffres information placés en partie haute du mot-code. Durant ce temps, le reste est emmagasiné dans les $m$ bascules. Après que tous les chiffres d'information ont été introduits dans le circuit, donc que le reste a été calculé, le commutateur bascule en position 2 et on peut lire successivement les coefficients du reste, donc les chiffres de parité. Le code est ici un code systématique.

Une autre technique de codage est l'utilisation d'un **registre à décalage à réaction.** L'avantage d'un tel circuit séquentiel est de pouvoir fonctionner de manière autonome sans signal appliqué de l'extérieur : voir *figure* 20.

Soit $e_i(t)$ l'état de la bascule $i$ à l'instant $t$, on a alors :

$$e_0(t+1) = e_1(t)$$
$$e_1(t+1) = e_2(t)$$
$$\text{»} \qquad \text{»}$$
$$e_{m-2}(t+1) = e_{m-1}(t)$$
$$e_{m-1}(t+1) = e_0(t) \oplus a_1 e_1(t) \oplus ... \oplus a_{m-1} e_{m-1}(t)$$

En écrivant la suite d'états sous la forme d'une matrice vecteur :

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e_0(t) \\ \vdots \\ e_{m-1}(t) \end{bmatrix}$$

on a
$$\mathbf{e}(t+1) = \mathbf{C}\mathbf{e}(t)$$

où C est la matrice caractéristique du registre à décalage

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ & » & » & » & \\ 1 & a_1 & . & . & . & a_{m-1} \end{bmatrix}$$

Si, à l'instant de départ, l'état vaut $\mathbf{e}(0)$, alors, à l'instant 1, l'état est $\mathbf{Ce}(0)$, à l'instant 2, $\mathbf{C}^2\mathbf{e}(0)$, ..., à l'instant $i$, $\mathbf{C}^i\mathbf{e}(0)$. Nous avons systématiquement imposé le coefficient $a_0$ à la valeur 1, c'est une condition nécessaire pour que la matrice C ait une inverse. Dans ces conditions, l'état précédant chaque état du registre est unique. On peut donc se poser le problème suivant : partant d'un état

$$\mathbf{e}(0) \neq \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

au bout de combien de transitions revient-on à cet état ? Si, au départ, toutes les bascules sont dans 0, on revient à cet état en une transition. Le problème posé est donc celui de la détermination du plus petit entier $k$ tel que $\mathbf{C}^k\mathbf{e}(0) = \mathbf{e}(0)$. Ce nombre $k$ est appelé période de la matrice caractéristique C. On appelle polynôme caractéristique de la matrice C la quantité

$$|C \oplus xI| = P(x) \qquad (P(x) \text{ est de degré } m).$$

Un calcul simple montre que

$$P(x) = a_0 \oplus a_1 x \oplus ... \oplus a_{m-1}x^{m-1} \oplus x^m.$$

On démontre alors que la période de la matrice C est le plus petit entier $l$ tel que $x^l \oplus 1$ soit divisible par $P(x)$. Le nombre de bascules étant fixé, on peut aussi rechercher le polynôme $P(x)$ tel que la matrice caractéristique associée ait une période maximale : cette valeur maximale est $2^m - 1$. On démontre alors que $P(x)$ doit obéir à

certaines conditions mathématiques, il doit être primitif (P ($x$) est primitif s'il est irréductible et s'il divise $x^n \oplus 1$ pour $n$ supérieur ou égal à $2^m - 1$). A l'aide d'un registre à décalage à réaction à $m$ états, on peut réaliser le codage d'un code cyclique systématique, comme on le voit *figure* 21.

Les coefficients $a_i$ sont ceux du polynôme générateur du code. L'état du registre est au départ l'état nul (0 ... 0). Le commutateur étant en position 1, on introduit les $(n - m)$ chiffres d'information $i_{n-1} ... i_m$. Ces chiffres sont en même temps transmis sur le fil de sortie. A la première impulsion de rythme, l'état du registre sera

$$\begin{bmatrix} 0 \\ » \\ 0 \\ i_{n-1} \end{bmatrix}$$

qu'on va écrire $i_{n-1}$ U avec

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ » \\ 1 \end{bmatrix}$$

La matrice caractéristique de ce registre s'écrivant

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 ... & 0 \\ & » & » & » & \\ a_0 & a_1 & ... & a_{m-1} & \end{bmatrix}$$

à la deuxième impulsion, l'état du registre sera

$$i_{n-1}CU \oplus i_{n-2}U.$$

En continuant le raisonnement, à la $j$-ième impulsion, l'état sera

$$i_{n-1}C^{j-1}U \oplus i_{n-2}C^{j-2}U \oplus ... \oplus i_{n-j}U.$$

Passé la $(n - m)$-ième impulsion, le commutateur bascule en position 2. En sortie, on ne va donc pas retrouver les symboles d'information, mais les symboles de parité élaborés par traitement logique : c'est bien un code systématique. A noter que, pendant ces $m$ dernières impulsions, on applique à l'additionneur en sortie deux entrées identiques, les symboles de contrôle. Donc, comme la sortie de cet additionneur est reliée à la bascule $B_{m-1}$, le registre va peu à peu se remplir de « 0 », ce qui permet le codage du mot suivant.

### Décodage et correction des erreurs

Soit $\mathbf{u}_1$ le mot émis, $\mathbf{u}_2$ le mot reçu, la séquence erreur est par définition

$$\mathbf{e} = \mathbf{u}_1 \oplus \mathbf{u}_2.$$

Si $\mathbf{e} = (0 ... 0)$, le mot est correct et aucune correction n'est nécessaire (s'il y a plusieurs erreurs qui se compensent, on ne peut les voir). Si la séquence erreur appartient au code, il y a une erreur non détectable. Dans le cas où la séquence erreur n'est pas un mot-code, on peut détecter la ou les erreurs. Donc, la condition nécessaire et suffisante pour qu'une erreur soit détectable est que le polynôme $e$ ($x$) associé à la séquence erreur **e** ne soit pas divisible par le polynôme générateur $u_0$ ($x$).

La première opération à la réception de $u_2$ est de diviser $u_2$ ($x$), polynôme associé, par $u_0$ ($x$). Si le reste est nul, aucune éventuelle erreur n'est détectable. On peut pour cela utiliser un des circuits de division proposés au paragraphe précédent.

- *Détection d'erreurs simples.* Toute séquence erreur correspondant à une erreur simple est un permuté du mot (0 ... 01), c'est-à-dire $e$ ($x$) = 1. Ce polynôme réduit à une constante n'est divisible par aucun polynôme (sauf le polynôme formé de l'unique 1). Donc les codes cycliques détectent les erreurs simples.
- *Détection d'erreurs doubles.* Toute séquence erreur correspondant à une erreur double est un permuté du mot (0 .. 10 .. 1) dont le polynôme associé est $x^i \oplus 1$. Une condition nécessaire et suffisante pour détecter les erreurs doubles est que le polynôme générateur ne divise pas les polynômes $x^i \oplus 1$ $(0 \leqslant i \leqslant N - 1)$. On pourrait exposer les conditions de détection des autres erreurs multiples (triples...) par un raisonnement analogue.
- *Détection de paquets d'erreur.* Un paquet d'erreur de longueur au plus égale à $p$ est un permuté circulaire du mot $(0 .. e_1 .. e_p)$ où $e_1 ... e_p$ ne sont pas tous égaux à 0. A ces mots on peut associer $2^p - 1$ polynômes de degré au maximum égal à $(p - 1)$. Pour que $u_0$ ($x$) ne divise aucun de ces polynômes, il suffit que le degré de $u_0$ ($x$) soit au moins égal à $p$. Tout code (N, N $- m$) détecte donc les paquets d'erreur de longueur $p \leqslant m$.

Étudions maintenant les **possibilités de correction.** Dans le cas d'une erreur simple, $u_2 (x) = u_1 (x) \oplus x_i$. Donc $u_2 (x) \oplus x_i$ est un mot-code, c'est-à-dire divisible par $u_0$ ($x$). Avec une table de reste de division par $u_0$ ($x$), il est donc aisé de corriger l'erreur simple. Un raisonnement analogue peut être fait pour des erreurs multiples. A titre d'exemple, nous allons donner les circuits de codage et de décodage pour le code déjà abondamment étudié : le code cyclique (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$.

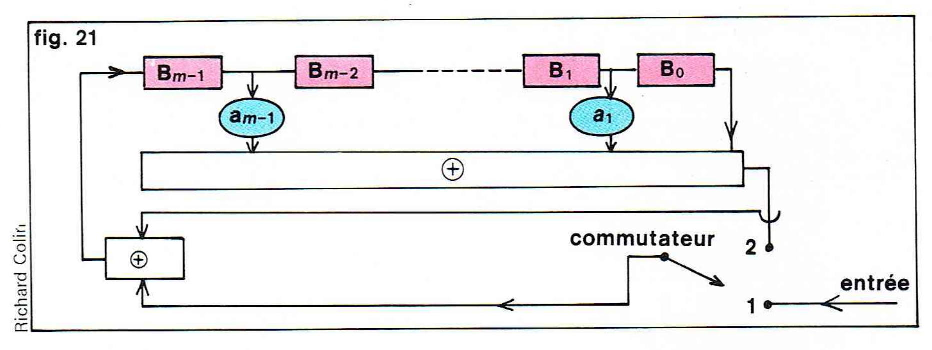
On réalise le codage par un registre à décalage dont le câblage est conforme à la *figure* 22 :

La matrice caractéristique de ce registre est

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

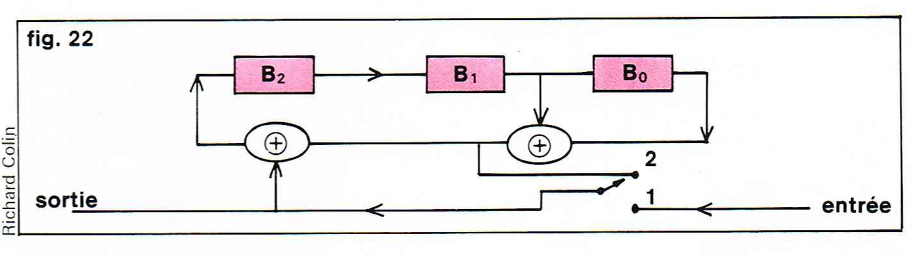
Le décodage (détection et correction d'erreurs simples) peut être réalisé par le circuit de la *figure* 23.

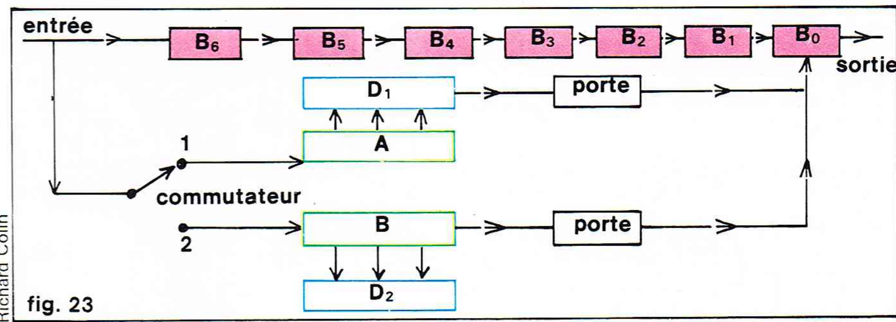
Il y a un registre $B_6 ... B_0$ qui sert à emmagasiner le mot reçu de longueur 7. A et B sont deux registres à décalage à réaction câblés de manière identique à celui utilisé pour le codage. Les décodeurs $D_1$ et $D_2$ servent à détecter certains états du registre : le symbole 1 émis chaque fois qu'un de ces états est décelé permet de corriger le symbole se trouvant dans la dernière cellule $B_0$ du registre. L'ensemble fonctionne de la manière suivante : les chiffres du mot reçu sont introduits à la fois dans $B_6 ... B_0$ et dans A qui permet de connaître la position du chiffre éventuellement erroné. La porte P est fermée jusqu'à ce que le dernier symbole soit introduit dans le registre $B_6 ... B_0$. Puis on ouvre P et on procède à l'opération de correction. Au même instant, il y a commutation de C en 2, et le mot suivant commence à remplir à la fois $B_6 ... B_0$ et le registre B. Donc séquentiellement le premier mot quitte $B_0 ... B_6$ et le chiffre erroné est corrigé lors de son passage en $B_0$.



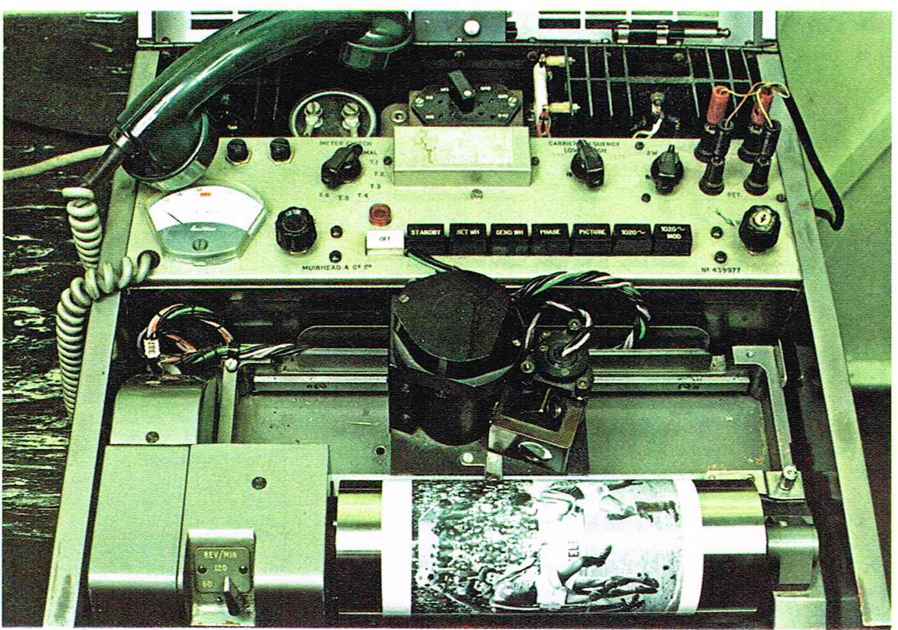

▲ ***Figure 21 :*** ***registre à décalage à réaction à m états permettant le codage d'un code cyclique systématique.***

◀ ***Page ci-contre, en bas, figure 19 : circuit opérant par division et permettant le codage systématique. Figure 20 : circuit séquentiel utilisant un registre à décalage à réaction.***




▼ ***Figures 22 et 23 : circuits permettant la correction d'erreurs dans le cas du code cyclique (7, 4) généré par $x^3 \oplus x \oplus 1$; fig. 22 : cas du codage; fig. 23 : cas du décodage.***



J. Bordas - Fotogram

▲ *Un bélinographe permettant la transmission à distance de textes, photographies, etc.*

Par addition modulo 2, il y a donc correction de ce chiffre. Ce code cyclique (7, 4), qui est un code de Hamming, détecte et corrige donc les erreurs simples. C'est un exemple facile d'emploi de la méthodologie des codes cycliques.

### Autres exemples de codes cycliques

Une généralisation des codes de Hamming est obtenue avec les **codes de Bose-Chauduri-Hocquenghem** proposés d'abord par Hocquenghem, puis par Bose et Chauduri (1960). Ce sont des codes faciles à construire dans lesquels la longueur du mot N est de la forme $2^r - 1$. Si l'on désire que le code corrige $q$ erreurs, le nombre maximal de chiffres par mot est $qr$. Le degré maximal du polynôme générateur est donc $qr$. Ainsi le code de Bose-Chauduri-Hocquenghem (15, 7), correspondant à $r = 4$ et $qr = 8$, donc $q = 2$, corrige deux erreurs indépendantes, détecte donc 4 erreurs indépendantes et les paquets d'erreur de longueur 8. Le code (15, 5), qui a pour paramètre $r = 4$, corrige les erreurs triples indépendantes, détecte 6 erreurs et les paquets d'erreur de longueur 10. Il est à noter ici que le degré du polynôme générateur 10 est inférieur au produit $qr = 15$.

Citons encore les exemples suivants avec $r = 7$ codes (127, .). Si on veut corriger les erreurs simples ($q = 1$), le mot-code a 120 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs doubles ($q = 2$), le mot-code a 113 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs d'ordre 10 ($q = 10$), le mot-code a 64 chiffres d'information; si on veut corriger les erreurs d'ordre 27 ($q = 27$), le mot-code a 18 chiffres d'information. Donc, et ce résultat est évident, pour augmenter la possibilité de correction, on augmente la redondance et, par là, on réduit le taux de transmission de l'information. A noter aussi que, plus les possibilités de correction sont grandes, plus les équipements nécessaires deviennent coûteux.

Un autre type de code très employé est le **code de Fire,** correcteur de paquets d'erreur de longueur supérieure à 2. Ainsi le code Fire, ayant pour longueur de mots-codes 155, dont 145 symboles d'information, donc code (155, 145), détecte et corrige les paquets d'erreur de longueur 3 ou moins. Ce code décèle certains paquets d'erreur de longueur 4, mais pas tous.

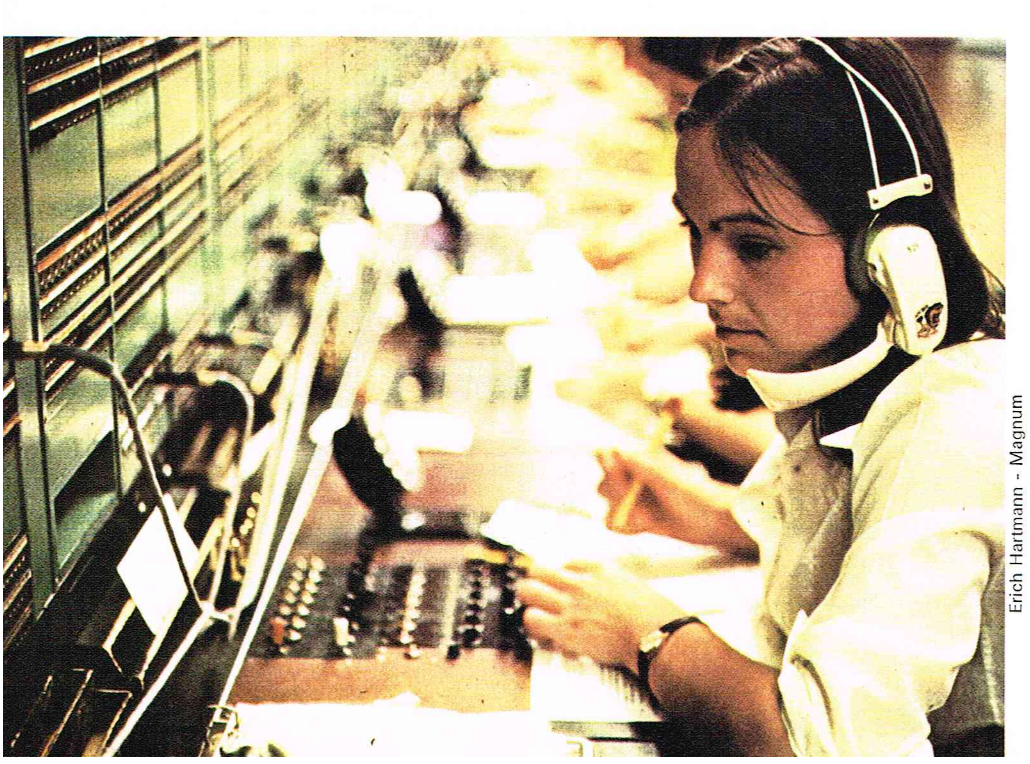
Enfin il existe des **codes cycliques raccourcis,** dérivés des codes cycliques, obtenus en annulant un nombre $l$ de chiffres d'information que l'on ne transmet pas ensuite sur le canal. On n'a plus à faire à proprement parler à un code cyclique, puisque le code n'est plus fermé pour la permutation circulaire. Étant donné aussi que le nombre de chiffres de parité est inchangé, donc augmente en valeur relative par rapport au nombre de chiffres d'information entre le code cyclique et le code raccourci, les possibilités de correction sont plus grandes.

Enfin signalons une autre possibilité d'erreur dont nous n'avons pas parlé, les **erreurs de synchronisation.** En effet, lors d'une transmission réelle il peut y avoir des symboles parasitaires ou au contraire disparition de symboles, ce qui peut tromper le récepteur sur le début ou la fin d'un mot-code. Les méthodes de détection ou de correction d'erreurs addition vues précédemment ne s'appliquent plus. Rappelons qu'il y a deux types de transmission : la transmission synchrone, où les mots sont transmis de façon continue, et la transmission asynchrone, où les mots sont transmis de façon irrégulière. Dans ce dernier cas, on peut synchroniser le récepteur; on peut ajouter au mot-code un préfixe afin de déterminer le début précis du mot. Dans le cas d'une transmission synchrone, l'omission ou l'introduction de symboles exige donc de rétablir parfois le synchronisme, c'est-à-dire de déterminer le nombre de symboles omis ou sautés. Une façon simple de déterminer les translations à droite ou à gauche est d'ajouter un préfixe à structure connue au mot-code. Ainsi, pour déceler un déplacement vers la droite ou vers la gauche, on ajoutera le préfixe 001. A la réception, on examine la zone allouée au préfixe : si on a 001, il n'y a pas de translation; si on a 000 ou 100, il y a eu déplacement à gauche; si on trouve 010 ou 011, il y a eu translation à droite. A noter que, si on rétablit le synchronisme, on ne retrouve pas le mot-code où s'est produite l'erreur et, en particulier, on n'y corrige pas les erreurs additives, mais on pourra les corriger éventuellement dans les mots qui suivent.

Il existe d'autres codes que les codes cycliques, en particulier les **codes convolutionnels** dont l'analyse est complexe. Leur structure est faite de blocs : dans une transmission continue, il y a un bloc de longueur $l_0$ qui contient le symbole d'information et $l_0$ ... $k$ symboles de contrôle. La différence avec les codes cycliques tient dans le fait que les $(l_0 - k)$ symboles de parité contrôlent les symboles d'information d'autres blocs. Un bloc ne joue donc plus le rôle d'un mot-code. Nous n'avons pas voulu dans cette partie développer tous les codes correcteurs d'erreurs, orientant notre exposé sur les principaux codes correcteurs; en effet, ceux-ci donnent une idée suffisante de la question.

Pour terminer, il faut rappeler le dilemme de tout système de transmission : on augmente la puissance des signaux, ce qui est coûteux, ou on utilise des codes détecteurs-correcteurs d'erreurs, ce qui introduit un retard à la réception. Suivant les cas d'espèce, on choisit la solution 1 ou la solution 2, ou parfois un mélange des deux.

▼ *Un standard téléphonique.*



Erich Hartmann - Magnum

## BIBLIOGRAPHIE

GALLAGHER R. G., *Information Theory and Reliable Communication*. - ROUBINE E., *Introduction à la théorie de la communication*. - SPATARU Al., *Théorie de la transmission de l'information*.

# LES MÉMOIRES ET L'ANALYSE DU SIGNAL

## *Les mémoires*

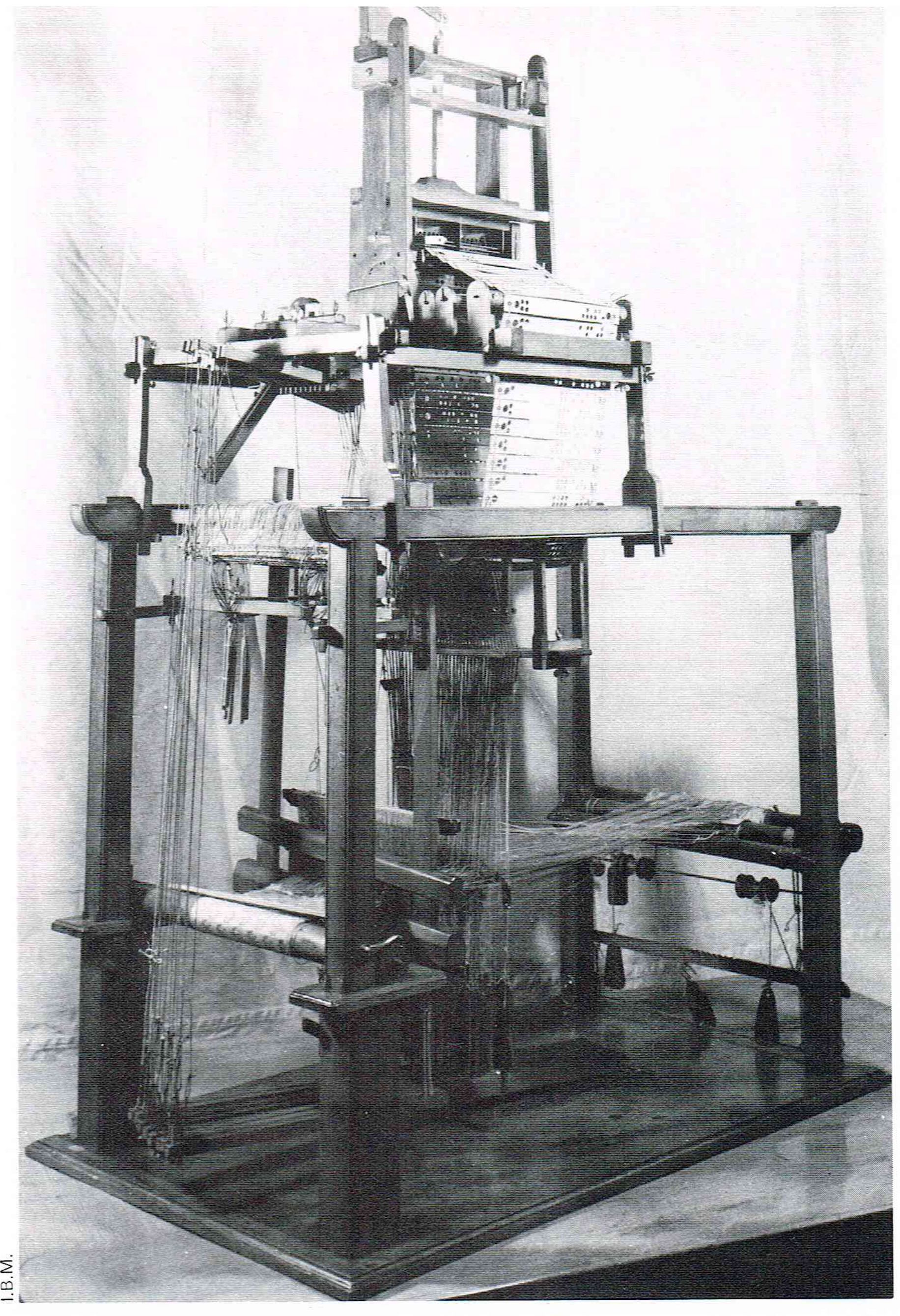
Le bloc diagramme simplifié de la *figure* 1 donne le schéma de principe d'un calculateur. Les périphériques d'entrée alimentent en information le calculateur ; ils sont de types divers : lecteur de rubans perforés ou de cartes, claviers de télétype, tubes cathodiques, disque ou bande magnétiques, convertisseur analogique digital. La mémoire centrale a pour fonction de conserver les données, les résultats des calculs, les programmes. L'unité arithmétique et logique effectue les opérations mathématiques de base. Tout est dirigé par l'unité de contrôle. L'ensemble unité de contrôle, unité arithmétique et logique, mémoire centrale, constitue l'unité centrale (Central Processing Unit : CPU). Les informations sont ressorties pour l'utilisateur par l'intermédiaire de périphériques de sortie : perforateur de ruban ou de cartes, claviers de télétypes, écrans de visualisation, imprimantes, mémoires magnétiques, convertisseurs digitaux analogiques agissant sur le procédé commandé.

Dans le cas d'entrée ou de sortie par mémoire magnétique, on s'aperçoit que dans ce schéma coexistent deux organes à fonction mémoire : c'est pour cela qu'on distingue mémoire interne et mémoire externe. Dans les ordinateurs des premières générations, il arrivait qu'on trouvât un tambour magnétique en mémoire interne. La différence essentielle exigée aujourd'hui entre ces deux types de mémoire est le temps d'accès. Les mémoires externes seront des organes peu coûteux mais à forte capacité, donc de temps d'accès important. Les mémoires internes doivent avoir un temps d'accès faible, elles sont de capacité plus faible et, en principe, plus onéreuses.

Ces dernières années, la vitesse de travail de l'unité arithmétique et logique et de l'unité de contrôle a énormément augmenté. Pour utiliser cette possibilité, la taille nécessaire de la mémoire interne augmente. Une fois l'information traitée, il est nécessaire d'alimenter le calculateur en nouvelles informations venant des mémoires extérieures. Celles-ci étant lentes, le processeur d'entrée sortie ne va pas fonctionner avec un rendement important. Pour résoudre ce problème, deux méthodes sont actuellement proposées : soit trouver des technologies de mémorisation peu onéreuses, mais rapides et autorisant une conservation importante, c'est la recherche d'une solution « hardware » ; soit utiliser le logiciel en créant une hiérarchie des mémoires. L'écart entre la vitesse de la mémoire externe et celle de la mémoire interne est comblé par une mémoire intermédiaire de capacité supérieure à celle de la mémoire interne et plus rapide que la mémoire externe. Ainsi, entre un disque et la mémoire interne, on peut placer une mémoire à tores de ferrite, de bonne capacité, mais moins lente : c'est le principe de la mémoire tampon (« buffer »). Une autre solution est d'augmenter les possibilités de contrôle du CPU. Quand cet organe peut connaître de quelle information il aura besoin une fois son travail terminé, on peut transférer ces informations en temps voulu dans la mémoire interne. Dans ces conditions, le calculateur présente une mémoire interne de temps d'accès rapide (celui de sa réelle mémoire interne) et de grande capacité (celle de sa mémoire externe) : c'est la solution nommée mémoire virtuelle, qui demande un contrôle complexe (savoir quel morceau du programme est dans telle partie de la mémoire...). Depuis dix ans, une autre différence de rapidité est apparue, entre les mémoires à tores de ferrite et l'unité arithmétique et logique à base de circuits transistorisés : on a comblé cette différence par l'adjonction dans les gros systèmes d'un cache-mémoire dont la gestion est assurée par l'unité de contrôle mémoire.

## *Bref historique*

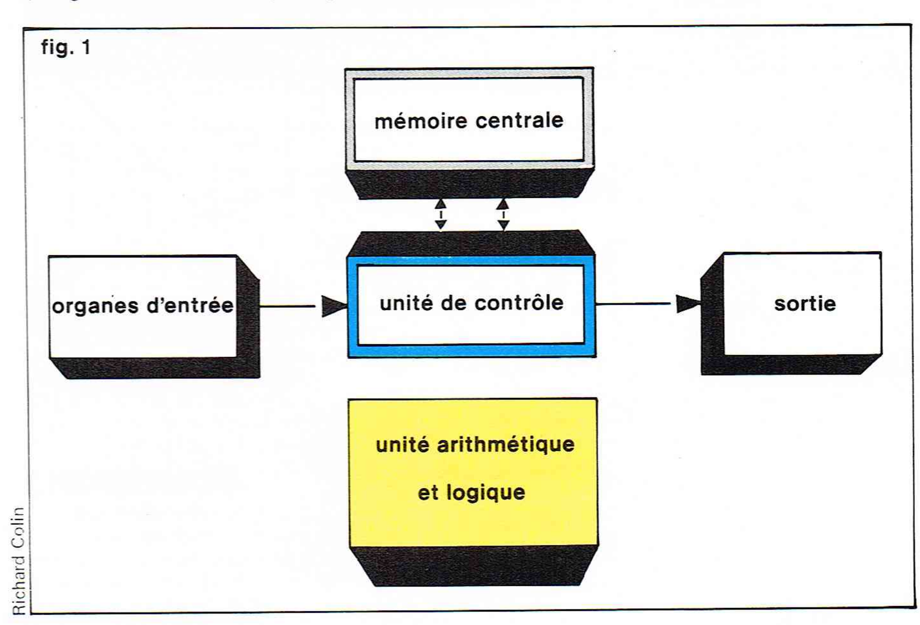
Dès 1833, l'ingénieur anglais Charles Babbage proposait la construction d'une mémoire mécanique destinée à conserver, non seulement les nombres nécessaires au calcul, mais aussi les instructions demandées pour effectuer ces calculs, ce qui était nouveau. La capacité était de 1 000 nombres, chacun de 50 chiffres décimaux...



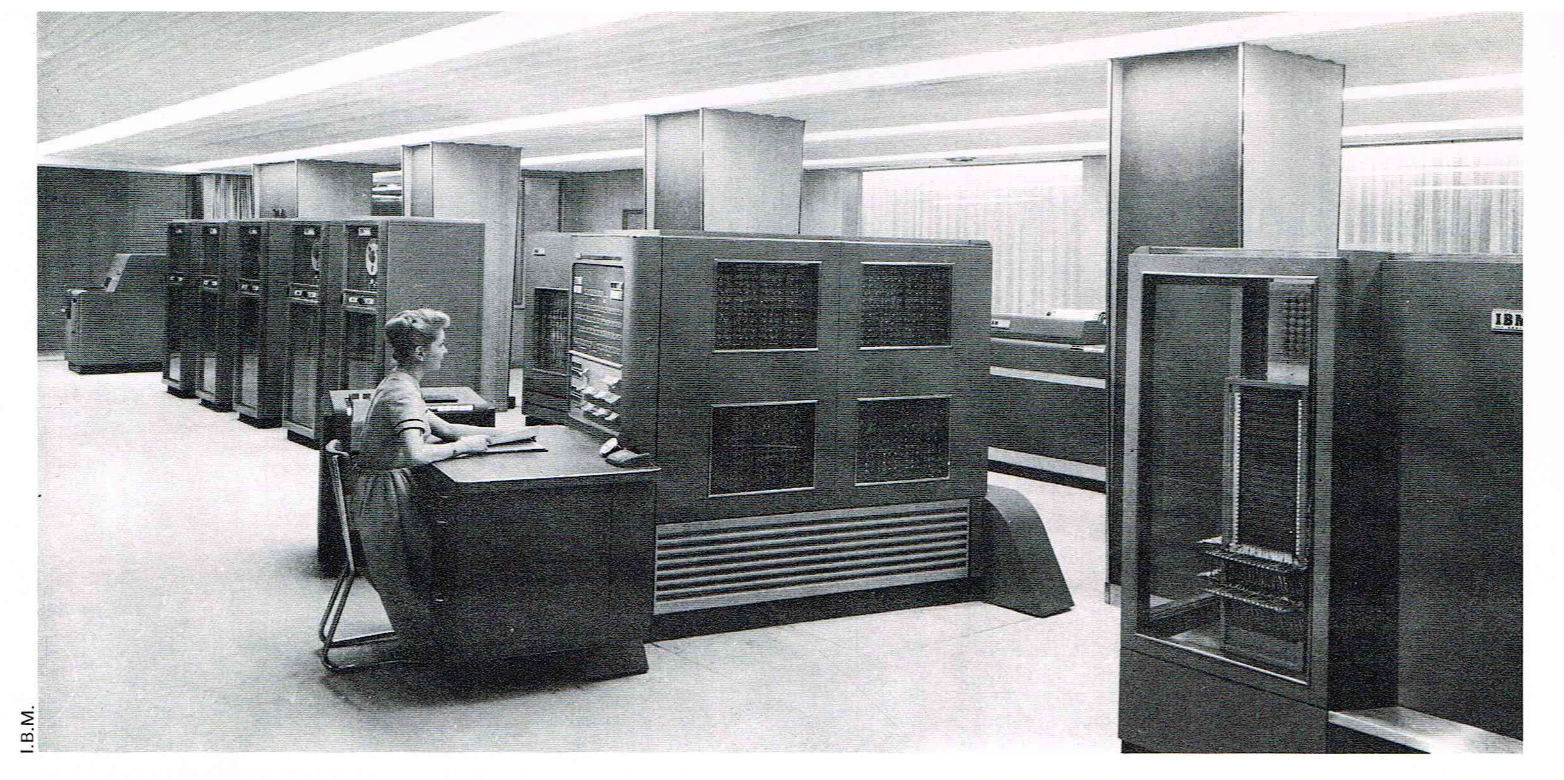
I.B.M.

▲ ***La machine de Falcon (1728) utilise pour la première fois la carte perforée pour la commande des fils de chaîne. Ce principe sera repris et amélioré en France par Jacquart.***

▼ *Figure 1 : schéma de principe d'un calculateur.*




Richard Colin



I.B.M.

▲ *L'ordinateur IBM 704, mis en vente en 1954, pouvait être équipé d'une mémoire électrostatique ou d'une mémoire magnétique à tores.*

▶ *Figure 2 : schéma de principe de la cellule de base de la mémoire du calculateur SEAC mis au point en 1951 aux États-Unis par le « National Bureau of Standards ». Cette cellule de base comprenait deux diodes et un condensateur.*

▼ *Figure 3 : schéma d'ensemble des différents organes intervenant dans les transferts et les opérations à l'intérieur d'un ordinateur.*

mais cette mémoire ne vit pas le jour, à cause des limites imposées par la construction d'organes mécaniques à cette époque. Les chiffres devaient être conservés à l'aide de roues dentées et les instructions à l'aide de cartes perforées (déjà utilisées en France par Jacquard pour les métiers à tisser). Sur ce modèle naquit en 1944 l'un des premiers calculateurs, le Harvard Mark 1 (mémoire de 72 nombres, chacun ayant 23 chiffres décimaux).

En 1941, Berey (université de l'Iowa) avait proposé une nouvelle technologie de mémorisation : un tambour rotatif portant 32 pistes, chacune ayant 51 condensateurs. Le signe de la charge du condensateur indiquait le chiffre binaire. L'unité arithmétique associée pour former le premier calculateur électronique utilisait 300 tubes à vide.

C'est en 1945 qu'est créé le fameux ENIAC (Electronic Numerical Integrater and Calculation) à l'université de Pennsylvanie, qui comportait 18 000 tubes ! Sa mémoire était faible (20 chiffres décimaux), constituée de registres à base de tubes à vide. Une autre machine à calculer, l'EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer), possédait une mémoire plus importante pour les données et les instructions, mémoire réalisée par une ligne à retard à mercure. En Angleterre, à l'université de Manchester, on a employé dès 1948 un tube à rayons cathodiques (tube de Williams) comme mémoire. La lecture de l'information était faite par bombardement électronique de l'écran (la lecture était destructrice, il fallait régénérer l'information). C'est aussi la première utilisation d'un tambour magnétique. En 1954, IBM propose son calculateur 704 équipable soit d'une mémoire électrostatique, soit d'une mémoire magnétique à tores. IBM équipe aussi son modèle 650 d'un tambour. Dès 1950, Harvard III (à l'université de Harvard) utilisait comme entrée sortie une bande magnétique. Harvard IV, le calculateur suivant, innove avec, comme organe de mémoire rapide, des registres à décalage magnétiques.

fig. 2

diodes

- 4 V

2 V = "0"

- 2 V = "1"

+ 4 V

C

entrée et sortie

R

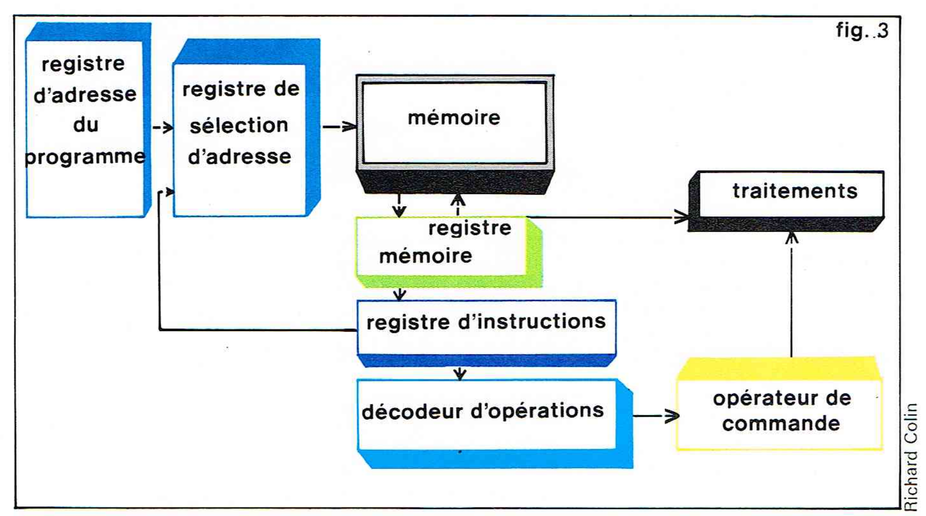
Richard Colin

En 1951, le « National Bureau of Standards », pour son calculateur SEAC, développe une mémoire dont la cellule de base est constituée de deux diodes et d'un condensateur (*fig.* 2) : capacité de 256 mots de 8 chiffres binaires, temps de cycle de 6 μs. A partir de 1951, J. W. Forrester et W. N. Papion développent au Massachusetts Institute of Technology une mémoire magnétique à ferrite. Le premier calculateur utilisant cette mémoire date de 1953. Ses avantages sont si évidents que bientôt tout nouveau calculateur utilise les ferrites. En 1955, Blais propose la mémoire à film magnétique, et, en 1960, Long l'améliore avec une nouvelle technologie moins chère. Des mémoires de ce type ont été utilisées par UNIVAC dans la série des 9000 jusqu'en 1966. Vers 1956 naissait le disque magnétique, qui est encore aujourd'hui l'organe de conservation le plus utilisé.

Les premières mémoires à semi-conducteur ont été commercialisées par IBM en 1965 dans la série 360/85 : en fait, une partie seulement de la mémoire était à semi-conducteur. C'est en 1970 seulement que l'IBM 370/145 présente une mémoire entièrement à semi-conducteurs. Cela marque vraisemblablement le début du déclin de la mémoire à tores.

## *Organisation générale d'un ordinateur*

Nous donnerons ici un schéma d'ensemble des différents organes composant un ordinateur, afin de replacer la fonction mémoire dans son contexte. Un ordinateur est un organe mécanique et électronique destiné à traiter l'information. Ce traitement se fait à partir de deux types d'opérations : des opérations de transfert et des opérations spécialisées dans des cellules. A chaque instant, des circuits de commande déterminent quels transferts et quelles opérations sont à réaliser. Ces circuits prennent dans les mémoires les informations nécessaires à la réalisation du traitement. Le traitement a été déterminé par un programme, suite d'instructions, écrit par l'utilisateur, généralement dans un langage dit « évolué » (FORTRAN,




Richard Colin

COBOL, PL1, etc.). Ces instructions sont transcrites dans un langage dit langage machine dont le décodage permettra la commande directe des circuits. Pour simplifier, nous supposons que ce programme final est mémorisé, placé en mémoire centrale, et aussi que la suite logique des instructions est rangée en mémoire en séquence à partir d'une position de départ connue. Les organes intervenant sont alors le registre d'instruction, le registre d'adresse, le décodeur d'opération, l'opérateur de commande (*fig.* 3).

A partir de l'adresse de l'instruction contenue dans le registre d'adresse du programme et transmise au registre d'adresse de la mémoire, on trouve en mémoire l'instruction qui est transférée au registre d'instruction. L'adresse de l'instruction est incrémentée de 1, ce qui permettra d'aller chercher l'exécution suivante une fois que l'instruction en cours aura été exécutée et mise dans le registre d'adresse.

L'instruction est décodée, et la partie opération est transmise au décodeur d'opération, qui commande à l'opérateur de commande une configuration de signaux qui permettront d'exécuter l'ordre contenu dans l'instruction. Lorsque cette dernière a été exécutée, un signal de fin d'instruction indique qu'on doit prendre l'adresse de l'instruction suivante.

La solution choisie pour enchaîner d'une instruction à l'autre était ici de générer un signal particulier de fin d'instruction. On pourrait procéder autrement : allouer à chaque opération une durée maximale et enchaîner sur l'instruction suivante à la fin de cette durée. C'est le principe des ordinateurs synchrones à rythmes où les transferts sont assurés par des rythmes aux instants définis par le concepteur ; l'écart entre temps réel et temps calculé risque de causer une perte de temps. Cette méthode demande une horloge électronique de bonne qualité. Dans les ordinateurs asynchrones arythmiques, nous avons encore évaluation de la durée maximale de l'opération, mais sans rythme de déclenchement : un système à retard alloue simplement à chaque opération sa durée maximale ; il y a encore risque de retard. Dans les ordinateurs asynchrones, un test évalue si l'instruction est terminée pour passer à l'instruction suivante. Ces machines sont plus chères à cause de la complexité des circuits et ne sont pas obligatoirement plus rapides, car les tests exigent du temps. En général, on préfère des machines synchrones à rythmes : il est toutefois fréquent que, dans ce type d'ordinateurs, des parties fonctionnent en régime asynchrone, en particulier pour les échanges entre l'unité centrale et les périphériques.

## *Essai de classification des mémoires*

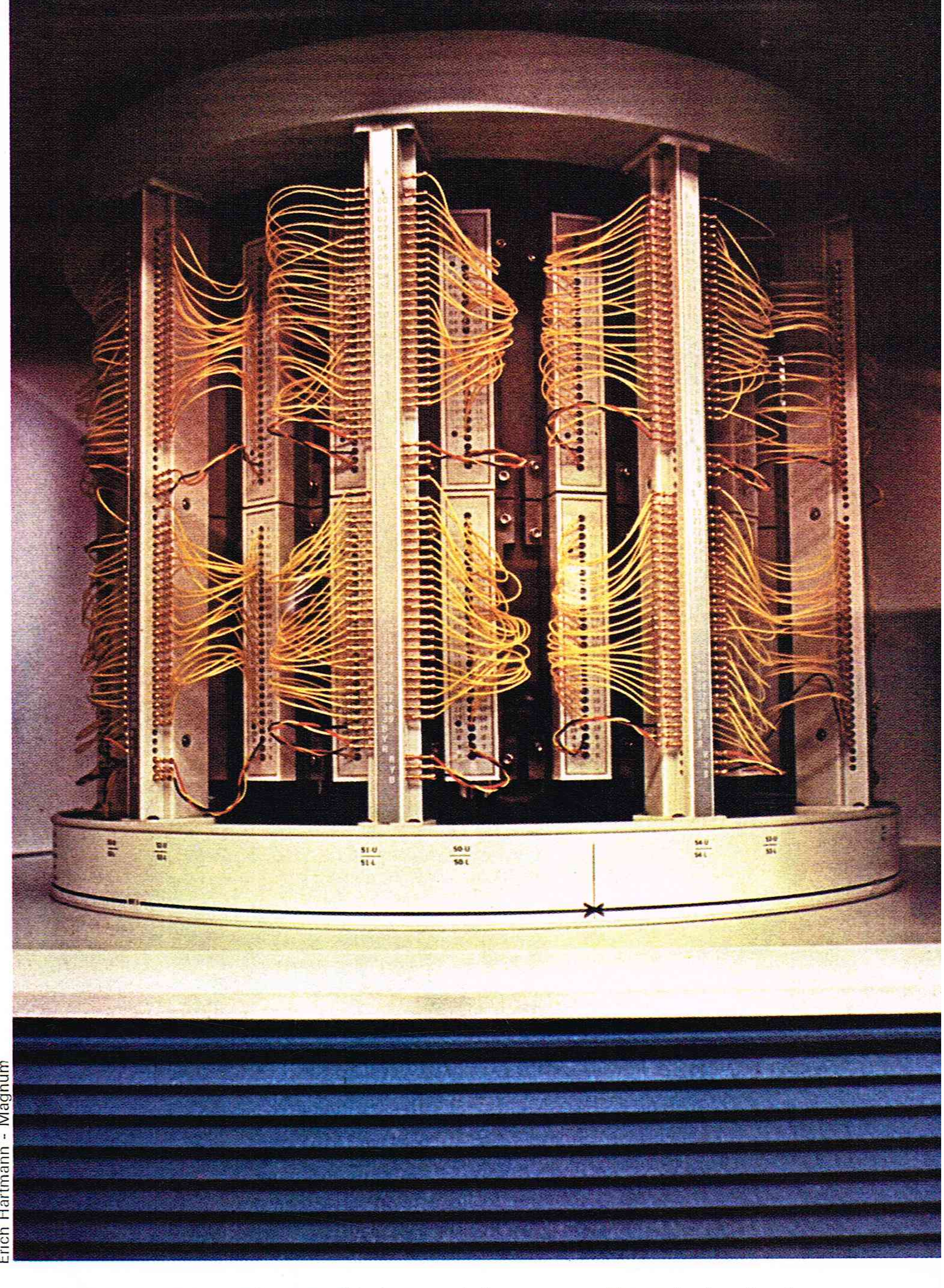
La mémoire est un organe central, très important, d'un système informatique : elle stocke les données, les programmes et les résultats. Rappelons que l'information va se trouver codée en alphabet binaire {0, 1} suivant des codes à longueur de mot fixe. Cette longueur de mot varie avec la qualité de l'information à coder (elle n'est pas la même, par exemple, pour un chiffre décimal et pour un caractère alphabétique). Nous ne nous préoccuperons pas dans ce qui suit du type de code utilisé, car il ne change rien au principe d'utilisation des mémoires. Dans certaines applications, on élabore à partir des mots-codes de base d'autres mots-codes de longueur plus importante, comprenant donc une partie parité ; cela permet de détecter ou de régénérer des parties modifiées.

Il existe plusieurs types de classification des mémoires, chacune ayant son avantage. Une première classification est fondée sur la notion de *capacité*, qui représente la quantité d'information stockable ou le nombre d'éléments à deux états stables qui la constituent. Elle s'exprime en bits, unité d'information habituelle. Les mémoires centrales à accès rapide ont des capacités allant de $10^5$ à $10^6$ bits. Les mémoires à rubans ou à disques magnétiques ont des capacités beaucoup plus grandes.

Une deuxième classification est offerte par le *mode d'accès*. L'accès est dit *aléatoire* lorsque l'information peut être lue avec un temps d'accès constant, indépendamment de l'endroit de stockage, et parce qu'on connaît son adresse. Ce mode d'accès est associé aux *mémoires statiques* dans lesquelles l'information est stockée aussi longtemps qu'on le désire. Le mode d'accès est dit *séquentiel* si la mémoire n'est pas adressable et s'il faut attendre le positionnement devant l'organe d'écriture ou de lecture de l'emplacement cherché. C'est le cas des mémoires à ruban magnétique. Ces mémoires sont dites *cinématiques*. Le mode d'accès est dit *semi-séquentiel* s'il est une combinaison des deux modes précédents. Ainsi, dans un disque magnétique, le choix de la piste est à accès aléatoire, mais la sélection dans la piste est à accès séquentiel. C'est aussi le mode d'accès des tambours magnétiques.

A côté des mémoires statiques et cinématiques, on distingue les *mémoires dynamiques* et les *mémoires à défilement*. Dans les mémoires dynamiques, l'information doit être régénérée périodiquement, le mode d'accès peut être séquentiel ou aléatoire. Dans les mémoires à défilement, les chiffres binaires d'information se propagent le long d'une « ligne », sont régénérés en sortie et réappliqués à l'entrée. Leur mode d'accès est obligatoirement séquentiel.

Une des caractéristiques des mémoires est leur *temps d'accès*. Le temps d'accès est le temps nécessaire pour extraire 1 bit de la mémoire. Ce temps d'accès est actuellement de l'ordre de 150 nanosecondes pour les mémoires à technologie MOS. Il faut se rappeler qu'il était de l'ordre



Erich Hartmann - Magnum

▲ ***Exemple de mémoire d'ordinateur : la mémoire est un organe central qui stocke les données, les programmes et les résultats ; l'information s'y trouve codée en code binaire.***

▶ *Les rubans perforés sont des mémoires utilisées surtout en fichiers ; leur écriture et leur lecture sont séquentielles.*

de la milliseconde pour les ordinateurs de la première génération. La limite imposée à la diminution de ce temps est la vitesse de la lumière, puisque l'information, présente sous forme d'impulsions électriques, ne peut aller à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le milieu constitué par les câblages (15 à 20 cm pour 1 ns). Donc, pour une distance de 1 mètre entre la mémoire et l'unité de calcul, le temps d'accès sera de l'ordre de 6 nanosecondes. La diminution du temps d'accès dépend de celle de la longueur des interconnexions, c'est-à-dire de la compacité des circuits (intégration à grande échelle des composants).

Un cycle de mémoire est constitué d'une opération de lecture et d'une opération d'écriture. Remarquons que certaines mémoires dites permanentes n'autorisent pas des opérations d'écriture. La durée du cycle est bien évidemment liée au temps d'accès. Ce dernier peut représenter 50 % de la durée du cycle pour les mémoires statiques. Pour une mémoire cinématique, par exemple un ruban magnétique, le temps d'écriture ou de lecture est négligeable devant le temps d'accès. D'ailleurs, le temps d'accès varie suivant l'endroit où est l'information et l'endroit où s'est arrêtée la bande après l'opération précédente.

Une opération de lecture peut être de deux types : destructive ou non destructive. Dans le premier cas, il faut récrire l'information, car l'opération de lecture a laissé la mémoire dans un état non défini. Dans le second cas, c'est inutile, car il n'y a aucune modification du contenu de la mémoire.

Les *puissances* consommées et dissipées sont aussi deux paramètres importants. Le choix du composant de base dépend en effet de ces deux facteurs, puisqu'on réalise des assemblages de plus en plus importants.

Citons enfin un dernier paramètre qui est employé pour les mémoires à débit séquentiel, le *débit d'information*. Le débit est la quantité d'information lue (ou écrite) par unité de temps. On peut atteindre actuellement plusieurs centaines de milliers de bits par seconde.

## *Organisation des mémoires*

Comme le bit, plus petit élément d'information stockable dans une mémoire, est trop petit pour développer des manipulations complexes, plusieurs assemblages sont utilisés :

— le caractère à 4 bits permet de faire des calculs décimaux ($2^4 = 16) > 10$ ;

— le caractère à 6 bits permet de coder 64 symboles, 26 lettres, 10 chiffres ou 28 symboles spéciaux (signes algébriques, ponctuation, dollar...) ; ce caractère ne permet qu'un type de lettres ;

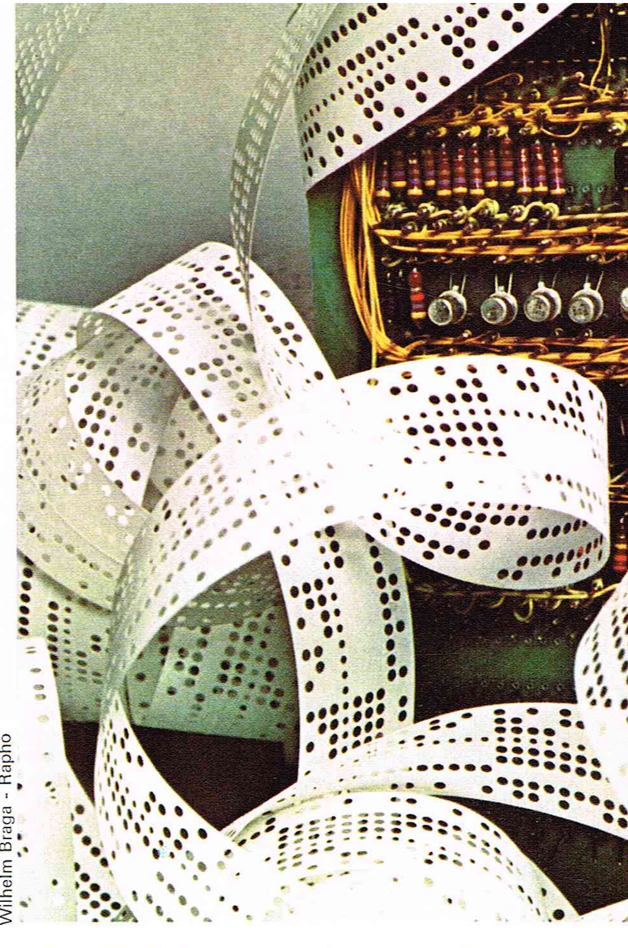
— l'octet ou caractère à 8 bits dont on utilise 7 chiffres pour l'information. On peut coder 128 symboles (majuscules, minuscules, chiffres, etc.). Le huitième digit est un chiffre de contrôle de parité. C'est l'assemblage le plus courant actuellement.

Pour représenter des entrées plus complexes du type code d'une instruction, on utilise le mot. Un des premiers minicalculateurs, le PDP 8 de Digital Equipment, fonctionnait en mots de 12 bits. Actuellement, on s'oriente vers des mots dont la longueur est un multiple de l'octet (mots de 16, 32 ... bits). Le choix du type de mot dépend de la destination préférentielle que le constructeur attribue à l'ordinateur. Si ce dernier doit servir à plusieurs types d'applications très différentes, on choisit une longueur de mot, on sait alors que certains problèmes exigeants en précision demanderont que l'on travaille par exemple en doubles mots.

Dans une mémoire, on groupe les mots en blocs, ce qui permet de diviser la recherche d'un mot en deux temps : localisation du bloc, recherche du mot dans le bloc. La taille des mémoires adressables est actuellement trop importante pour rechercher directement un mot.

## *Méthodes de consultation des mémoires*

Pour un ordinateur, on ne peut parler d'*une* mémoire. Dès que le travail demandé est important, la taille exigée pour la mémoire centrale, la plus rapide, est élevée, donc son coût important. Du fait donc de ces possibilités de stockage limitées, on utilise des mémoires de masse de grande capacité mais de temps d'accès plus élevé (tam-


Wilhelm Braga - Rapho

bours magnétiques, disques, bandes magnétiques). Les informations situées sur ces mémoires ne sont pas directement traitables, il faut les faire transiter par la mémoire centrale pour effectuer des opérations en les utilisant.

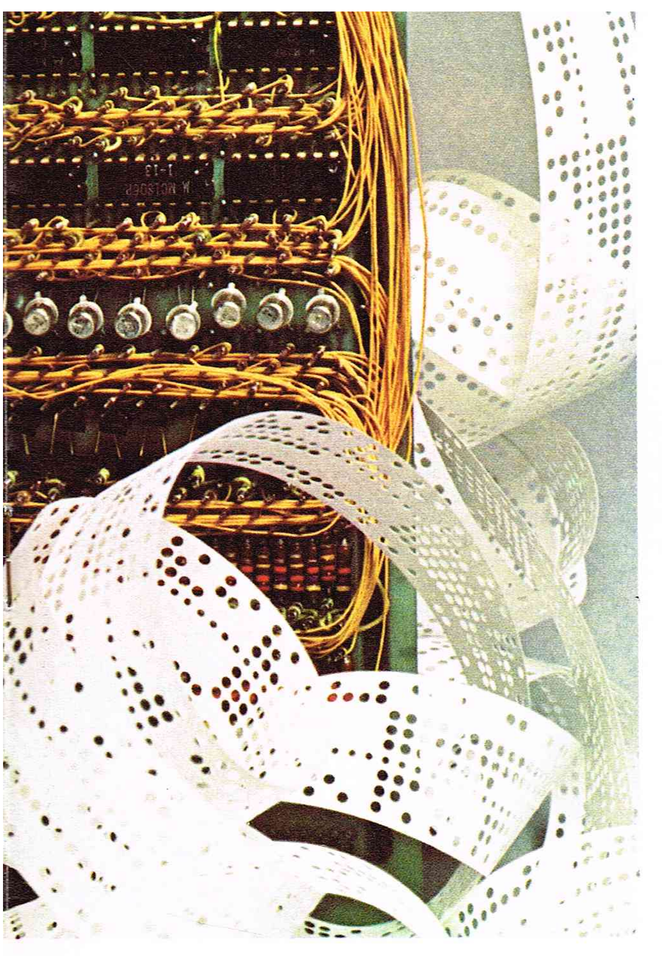
Les méthodes de consultation se scindent en deux suivant que la mémoire est adressable ou ne l'est pas. Dans le cas des *mémoires adressables*, on repère un élément par son adresse. La donnée d'une adresse permet l'accès direct à l'élément qu'elle désigne, c'est une consultation aléatoire. Il ne faut pas confondre adresse et contenu de l'élément mémoire, de même qu'on ne confond pas l'adresse d'un appartement dans un quartier avec les personnes qui l'habitent. Ces mémoires sont réalisées en tores magnétiques, films minces magnétiques ou semi-conducteurs. Dans une mémoire non adressable, on a un accès séquentiel à l'information, puisqu'on ne peut accéder directement à elle. Pour extraire une information, on peut opérer par un déroulement séquentiel exhaustif qui est la méthode la plus simple, ou par des repérages.

Ainsi, si les informations sont ordonnées et repérées par un numéro, on peut ne lire que *n* informations. On peut aussi placer en tête de chaque information une étiquette qui la caractérise ; pour la recherche d'une information dont on connaît nécessairement l'étiquette, on lit alors successivement les indicatifs jusqu'à trouver la coïncidence. Cela nécessite de lire toujours la mémoire à partir de son début. Les tambours magnétiques, les disques magnétiques sont des exemples de mémoires non adressables.

## *Exemples de mémoires*

Parmi les mémoires adressables, les plus utilisées jusqu'à présent sont les **mémoires à tores de ferrite.** Leurs capacités peuvent être de l'ordre de plusieurs millions de bits. Avec des temps de cycle plus petits (300 ns), on trouve les **mémoires à films magnétiques minces.** Actuellement se développent les **mémoires à semi-conducteurs** (ainsi, en 1976, avec une technologie MOS Canal N, une mémoire de 4 096 bits avec un temps d'accès de 150 ns).

Les **tambours magnétiques** peuvent aussi être adressables, mais on les classe plutôt parmi les mémoires non adressables. Il s'agit de cylindres recouverts d'un matériau magnétique tournant devant des têtes magnétiques. On appelle piste la zone située devant chaque tête. Le temps de consultation moyen est celui d'une demi-rotation du tambour. Une bonne utilisation est d'inscrire des quantités d'information occupant presque totale-



ment une piste. Dans ce cas, on a une consultation aléatoire, puisqu'il suffit de désigner la piste. Leur capacité peut être très grande.

Un **disque magnétique** est un disque recouvert de matériau magnétique tournant devant des têtes de lecture. La surface est divisée en pistes, ce qui permet un adressage par piste, puis une lecture séquentielle de la piste. Ici encore, il est souhaitable qu'un bloc d'information occupe environ une piste. Quand il n'y a qu'un disque et une tête de lecture, la consultation se fait comme nous l'avons indiqué et le temps de consultation comprend le temps de déplacement de la tête, le temps d'accès au bloc, puis le temps de lecture. Quand il y a plusieurs disques et une tête de lecture par face, la consultation se fait par adressage du disque et de la piste, puis recherche séquentielle sur cette dernière. Quand il y a plusieurs faces et une tête par piste, les têtes de lecture n'ont plus besoin d'être déplacées.

Le **ruban magnétique** est certainement la mémoire la moins chère : un ruban recouvert de matériau magnétique défile devant une tête de lecture et une tête d'écriture. Le temps d'accès n'a pas ici d'intérêt, en revanche on peut caractériser ces mémoires par le débit d'information (au maximum 100 000 caractères par seconde). A cause de leur grande capacité, ces mémoires sont utilisées essentiellement en fichiers.

Des **lignes à faible vitesse de propagation** sont utilisées aussi en mémoires. L'information circule sur la ligne : quand elle parvient en sortie, elle est régénérée et réinjectée à l'entrée. Elle tourne donc constamment et peut être extraite en bout de ligne. Les lignes à magnétostriction présentent les plus fortes capacités (temps de circulation entre 500 $\mu$s et 3 ms pour $2 \times 10^6$ bits). C'est une mémoire adressable, car on connaît le rang de l'information.

Des **mémoires fixes à éléments passifs** (résistances, capacités...) sont aussi réalisées une fois pour toutes; elles sont adressables et non modifiables. Seule la lecture est possible.

Citons encore comme mémoires les **cartes et rubans perforés.** Ce sont surtout des mémoires utilisées en fichier. Une carte peut représenter 80 caractères représentés par 1, 2 ou 3 trous sur 1, 2 ou 3 lignes parmi 12 sur chaque colonne. Le ruban fonctionne sur le même principe, mais il est séquentiel à l'écriture comme à la lecture. Ce sont des mémoires non adressables.

Nous allons maintenant donner les éléments technologiques élémentaires pour la compréhension des cellules unitaires de mémoire.

## *Les cellules de mémoires magnétiques*

### *Rappel de ferromagnétisme*

Les propriétés magnétiques d'un matériau proviennent de l'existence de moments magnétiques dans les atomes. Le phénomène macroscopique observé est dû à la combinaison de ces moments élémentaires : il résulte de l'alignement sur une direction de ces moments. Pour expliquer le ferromagnétisme, Weiss a émis l'hypothèse de l'existence, dans les atomes présentant ces propriétés, d'un type d'interaction différent des interactions électriques ou magnétiques, le champ moléculaire. Sans entrer dans le détail, disons que l'action des champs moléculaires est de constituer des domaines aimantés à saturation. Au contraire, une action magnétique partage à l'infini ces domaines. Par conséquent, à l'état d'équilibre, tout corps ferromagnétique va se présenter comme un assemblage de domaines dans lesquels la matière est aimantée à saturation; ces domaines sont de l'ordre de la centaine de microns, ils sont observables par l'utilisation de l'effet magnéto-optique de Kerr.

Dans un matériau désaimanté, l'aimantation observée est nulle, car les aimantations des domaines se compensent. Si on applique un champ extérieur croissant, il y a d'une part déplacement des parois des domaines (les domaines orientés dans le sens du champ grandissent) et d'autre part rotation de l'aimantation pour se rapprocher de celle du champ. On observera un phénomène d'hystérésis, car, au cours d'une décroissance du champ, les domaines ne retrouvent pas leurs configurations initiales.

Les phénomènes **ferromagnétiques** sont liés à l'état cristallin de la matière. Un cristal ferromagnétique n'est jamais isotrope quant à ses propriétés magnétiques. Pour une valeur du champ appliqué, on obtient dans une certaine direction, dite de facile aimantation, une aimantation forte, tandis que, pour le même champ, l'aimantation obtenue sera faible dans la direction de difficile aimantation. Ces directions correspondent aux axes de symétrie du cristal. Ainsi, le cristal de fer de forme cubique présente trois axes de facile aimantation, les axes parallèles aux arêtes; les axes de difficile aimantation sont parallèles aux diagonales du cube (*fig.* 4). L'aimantation d'un cristal dans un champ uniforme est maximale dans la direction de facile aimantation.

Un phénomène plus complexe est l'**antiferromagnétisme.** Dans ce cas-là, le corps présente bien un alignement parallèle de tous les moments magnétiques des atomes, comme pour le ferromagnétisme, mais ces moments sont orientés alternativement dans un sens et dans l'autre.

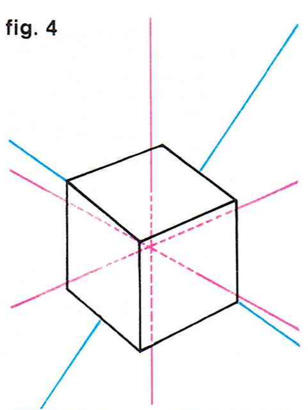
Si, de plus, les moments magnétiques ne se compensent pas, il existe une aimantation spontanée, c'est le **ferrimagnétisme,** propriété présentée par les ferrites. Les ferrites à base de manganèse sont des éléments de base des mémoires, car elles présentent un cycle d'hystérésis à peu près rectangulaire, ce qui permet de stocker les deux états d'une variable binaire. De plus, comme la valeur du champ minimal pour le basculement d'un état à l'autre est faible, cela permet de consommer peu d'énergie pour leur commande.

Les ferrites sont obtenues après broyage d'oxydes, moulage sous pression, puis cuisson à 1 200 °C; leurs propriétés mécaniques sont proches de celles des céramiques.

### *Mémoires à tores de ferrite*

Environ 60 % des mémoires des calculateurs sont actuellement constituées de tores de ferrite. Cette prédominance devrait bientôt faire place à celle des mémoires à semi-conducteur. La cellule de base est un tore magnétique traversé par un fil (*fig.* 5) ; le courant dans le fil crée un champ magnétique $\vec{H}$ qui produit une induction magnétique $\vec{B}$ dans le tore. Un champ $\vec{H}$ positif créé par une impulsion de courant va entraîner le point de fonctionnement (*fig.* 6) au-delà du point $\alpha$. A la fin de l'impulsion, le champ est nul, donc le point de fonctionnement est en $\beta$. Pour une impulsion de courant d'une polarité opposée, le point de repos aurait été $\gamma$. Ce cycle d'hystérésis est à peu près rectangulaire pour les tores fabriqués aujourd'hui. Les points $\beta$ et $\gamma$ indiquent donc le sens de l'impulsion appliquée : le tore constitue une mémoire unitaire, il suffit d'associer la valeur « 0 » ou « 1 » à chaque état.

fig. 4

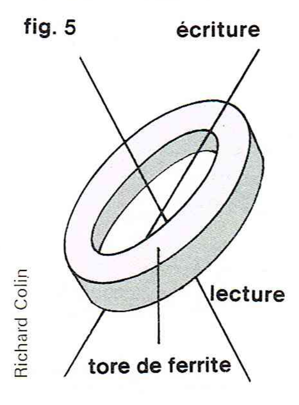



Richard Colin

▲ ***Figure 4 :* axes d'aimantation dans un cristal de fer de forme cubique.**

▼ ***Figure 5 :* un tore de ferrite traversé par deux fils (d'écriture et de lecture) représente la cellule de base de certaines mémoires magnétiques.**

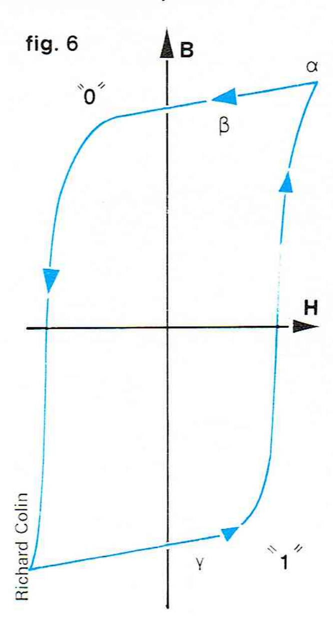
fig. 5




Richard Colin

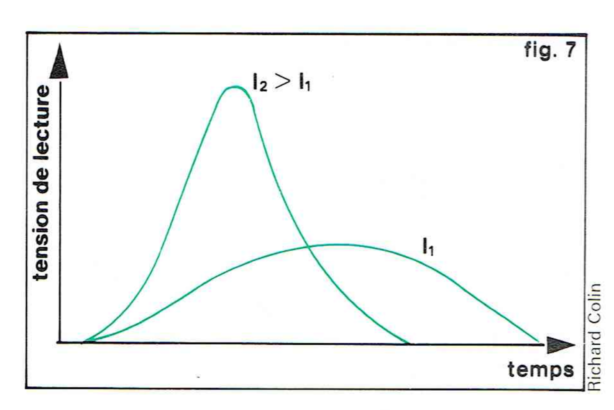
▼ ***Figure 6 :* cycle d'hystérésis d'un tore magnétique (voir développement dans le texte).**

fig. 6




Richard Colin

▶ *Figure 7 : variation de la tension de lecture en fonction du temps de basculement dans les tores de ferrite pour deux valeurs de l'intensité du courant.*




Pour utiliser une mémoire, nous devons effectuer deux opérations : l'écriture et la lecture. Pour un tore, la lecture est destructive. Pour écrire, on envoie une impulsion de courant dans le fil d'écriture : le sens est choisi de manière que le point de fonctionnement soit en β ou en γ (écriture d'un « 0 » ou d'un « 1 »). Pour lire, on envoie une impulsion de courant dans le fil d'écriture de manière à amener le point de fonctionnement au-delà de α. Si un « 0 » est écrit, il y aura faible variation de l'induction, donc faible impulsion sur le fil de lecture. Si un « 1 » est écrit, au contraire, on aura une forte impulsion de courant sur ce fil. En fin de lecture, quel que soit le chiffre lu, le point de fonctionnement est en β. Pour écrire un « 1 », on envoie une impulsion de courant dont le sens est tel que le point de fonctionnement est en γ ; on envoie une impulsion de signe opposé pour écrire un « 0 ».

L'utilisation de tores de ferrite comme unité élémentaire de mémoire pose d'énormes problèmes technologiques : il faut fabriquer des millions de tores avec des propriétés magnétiques et cristallographiques identiques. Après fabrication, on procède à des tests : test d'uniformité pour s'assurer des propriétés équivalentes de la production, test d'ensemble lorsque les tores sont assemblés en matrices et donc reliés par un ensemble complexe de fils (ce test est particulièrement utile pour les mémoires 3 D — à trois dimensions — où les basculements sont obtenus par coïncidence de courant).

On a intérêt à fabriquer des tores petits, d'abord pour des raisons d'encombrement, ensuite à cause de la vitesse de basculement. En effet, quand le courant destiné à faire changer d'état le tore augmente, le temps de basculement T diminue. Puisque l'aire sous la courbe est constante, la tension lue augmente (*fig.* 7). Pour un champ magnétique de valeur supérieure au champ coercitif (champ minimal pour entraîner un basculement), ce temps de basculement et le champ magnétique sont liés par la relation

$$T (H - H_c) = K.$$

Le coefficient K, facteur de commutation, est d'autant plus faible que le tore est petit. Par exemple, pour un courant de 400 mA, le temps de basculement est de 2 µs avec un diamètre de tore de 2 mm, de 1 µs avec un diamètre de 1,25 mm, de 0,7 µs avec 0,8 mm.

Pour accélérer le fonctionnement, on peut aussi employer la technique du basculement partiel. Cette technique, utilisée pour les mémoires à deux dimensions, est maintenant abandonnée à cause des progrès de la technologie. La lecture se fait par un courant suffisant pour entraîner un basculement complet du tore. En revanche, pour l'écriture d'un « 1 », le basculement est partiel, car le courant d'écriture revient à zéro avant que le tore ait basculé complètement.

Les paramètres du tore sont liés à la température. On a vu qu'on augmentait les vitesses de basculement en diminuant la taille des tores ; mais alors on doit prendre des fils de lecture ou d'écriture à faible section, donc à forte dissipation Joule. La quantité de chaleur dissipée dans une mémoire rapide à tores entraîne des augmentations de températures telles que les conditions de fonctionnement peuvent être modifiées. Par exemple, le champ coercitif $H_c$ est une fonction de la température. Ainsi, pour des durées de cycle de l'ordre de 500 ns, on peut assister à une augmentation de température de l'ordre de 50 °C. Une autre conséquence de l'utilisation de tores de faible dimension est le caractère non homogène des efforts mécaniques créés par les fils de liaison, effet qui peut modifier les performances attendues.

Pour obtenir des mémoires toujours plus rapides, on essaie d'améliorer les technologies de réalisation. Pour améliorer la vitesse, on peut diminuer :

— la taille du grain : on fabrique des tores à partir de grains d'environ 2 µm ; en dessous, on n'est pas assuré du caractère très rectangulaire du cycle d'hystérésis ;

— la taille du tore. Durant les vingt dernières années, la vitesse de basculement est ainsi passée de 1,5 µs à 0,1 µs. Actuellement, on semble avoir atteint la limite inférieure des dimensionnements ;

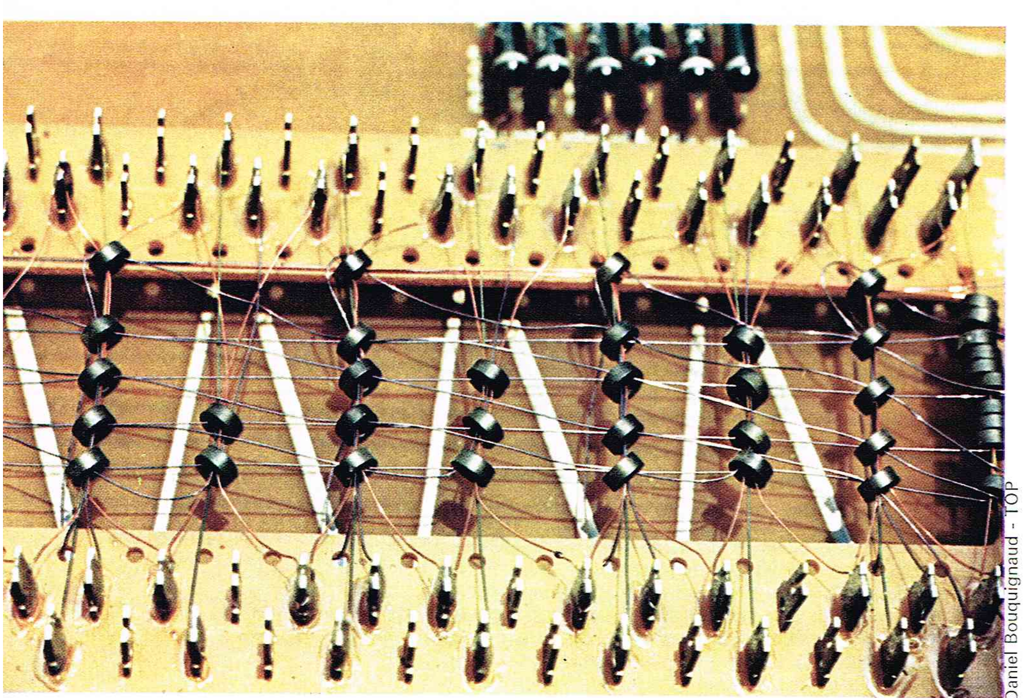
— le basculement partiel. Nous avons déjà parlé de cette technique. Ainsi Warner et Whalem ont obtenu une mémoire de 8 192 mots de 72 bits avec temps de cycle de 110 ns. L'impulsion de courant d'écriture de mot était de 500 mA et durait 30 ns. Cependant, ce type de mémoire 2 D demande beaucoup d'électronique de commande et a une densité d'information faible, aussi l'a-t-on peu à peu abandonné.

Pour diminuer le prix, on peut :

— utiliser une technologie de fabrication différente en réalisant les tores en série à partir de grandes plaques au lieu de les réaliser unité par unité (cette technique est utilisée pour les mémoires $2\frac{1}{2}$) ;

— réaliser des plans de mémoires avec le câblage en une seule fois.

▼ *Un ensemble de mémoires à tores de ferrite.*

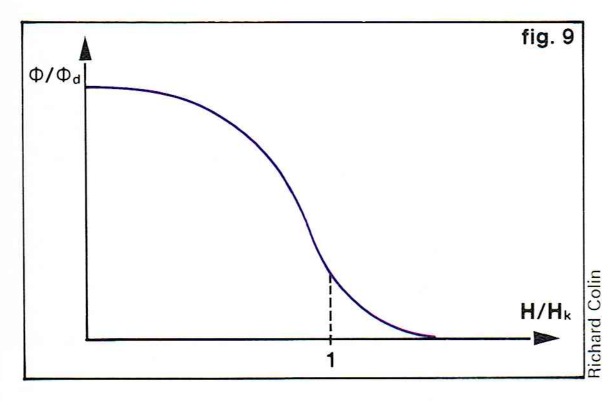


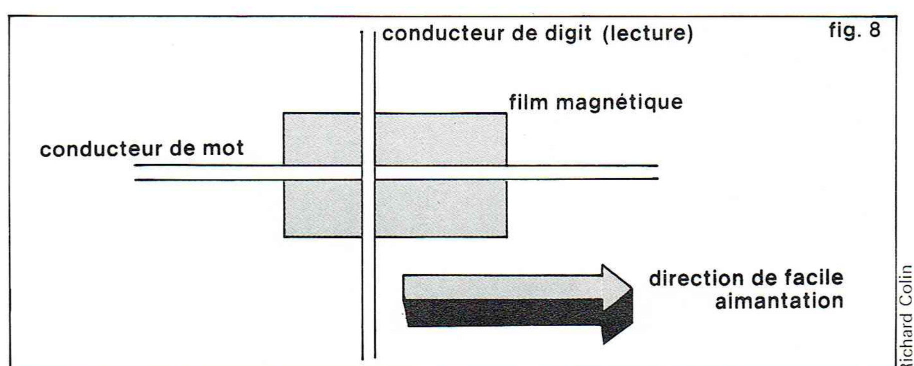
Daniel Bouquignaud - TOP

### *Le film magnétique mince*

Pour réaliser des mémoires très rapides, il semble intéressant de rechercher des éléments magnétiques monodomaines dans lesquels les phénomènes d'amortissement seront diminués. Au moment où les calculateurs munis de mémoire à ferrite prenaient leur essor, une publication de Blois (1955) sur les films magnétiques a soulevé beaucoup d'intérêt : l'auteur a montré qu'un film magnétique nickel-fer déposé par évaporation sous vide sur du verre en présence d'un champ magnétique présente un cycle d'hystérésis rectangulaire. Un tel film pouvait donc être utilisé comme élément bistable. Actuellement, les réalisations utilisent soit des couches de nickel pur, soit des couches d'alliage fer-nickel déposé sur du verre en présence d'un champ magnétique, de façon à former un plan continu de quelques dixièmes de micron d'épaisseur. On opère soit par évaporation, soit par électrolyse ; cette dernière est la plus courante : on effectue un dépôt sur un fil de cuivre d'environ 100 à 150 µ de diamètre en présence d'un champ d'orientation.

Le premier schéma d'utilisation des mémoires à film magnétique était calqué sur celui des mémoires à tores. On l'a vite abandonné à cause des couplages parasites

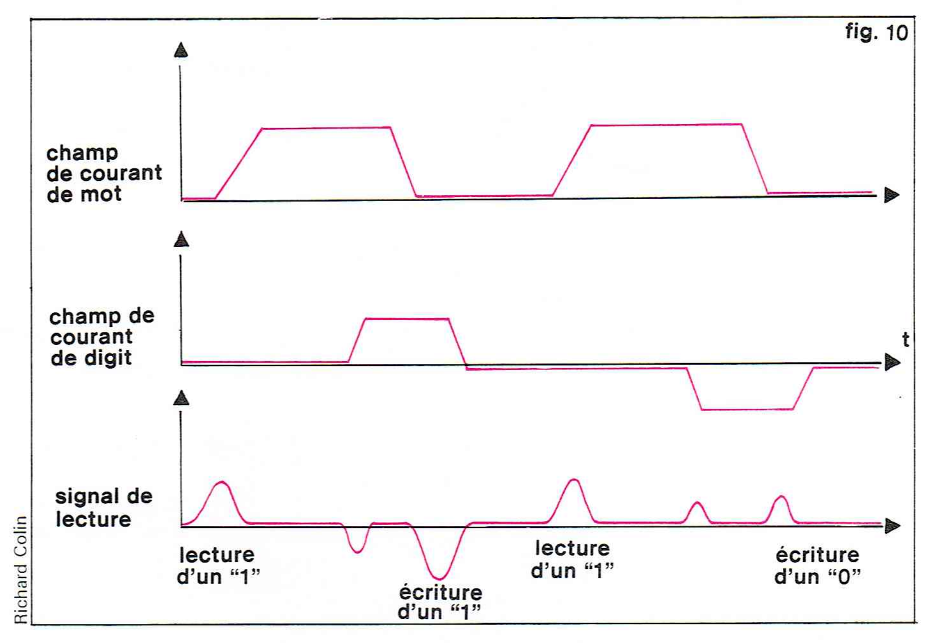



qu'il présentait. On utilise plutôt aujourd'hui le schéma de la *figure* 8. Sur chaque élément sont placés deux conducteurs : l'un parallèle à l'axe de facile aimantation, c'est le conducteur de mot, l'autre perpendiculaire au premier, c'est le conducteur de digit (méthode de sélection de Raffel). Au repos, le moment magnétique a l'une des directions de facile aimantation. L'application d'une impulsion sur le conducteur de mot champ transverse fait tourner ce moment d'un angle ; si on arrêtait l'impulsion à cet instant, le moment retournerait à son état initial, et on aurait une lecture non destructive. Si au contraire le champ appliqué est supérieur à $H_k$, le moment devient parallèle au fil de la lecture, puisque seul le moment longitudinal existe. Et on recueille une tension soit positive, soit négative. Le sens dans lequel le moment vient sur l'axe transversal dépend du sens du courant du mot. La polarité, par contre, de la tension recueillie dépend de la différence entre le flux initial et le flux final, qui est nul. Mais cette polarité dépend du sens du moment initial : ce sens correspond soit à un « 1 », soit à un « 0 » écrit. La courbe de la *figure* 9 indique les liens entre le rapport $\frac{\Phi}{\Phi_d}$ du flux du vecteur moment au flux de ce même vecteur au repos, en fonction du rapport du champ appliqué H au champ $H_k$.

Après l'interruption du courant de mot, donc du champ appliqué, le moment revient de manière indéfinie soit à l'état « 1 », soit à l'état « 0 ». Pour écrire une information, on ajoute un champ parallèle au sens de facile aimantation ; grâce au fil de digit suivant le sens de courant, on écrit « 1 » ou « 0 ». La *figure* 10 donne un exemple de séquence lecture-écriture. Il est à remarquer qu'apparaissent, outre les signaux de lecture, des signaux parasites dus aux rotations du moment magnétique ; c'est d'autant plus gênant que les signaux de lecture sont faibles (inférieurs à 1 mV).

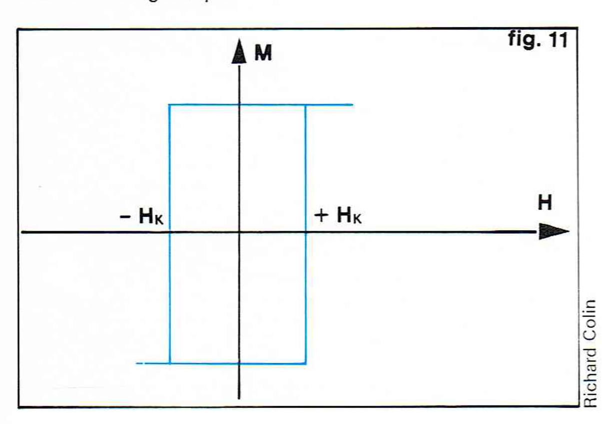
L'organisation de l'opération lecture-écriture avec des conducteurs de mot et des conducteurs de digit entraîne une organisation de mémoires à films magnétiques minces dites « par mot ». Tous les éléments d'un mot sont intégrés simultanément. Il faut donc beaucoup d'organes électroniques pour « lire » et régénérer. Le temps de basculement est de l'ordre de la nanoseconde, la vitesse de fonctionnement est donc limitée par les organes électroniques de commande. Un film magnétique mince possède un cycle d'hystérésis classique, du même type que celui d'un tore magnétique.

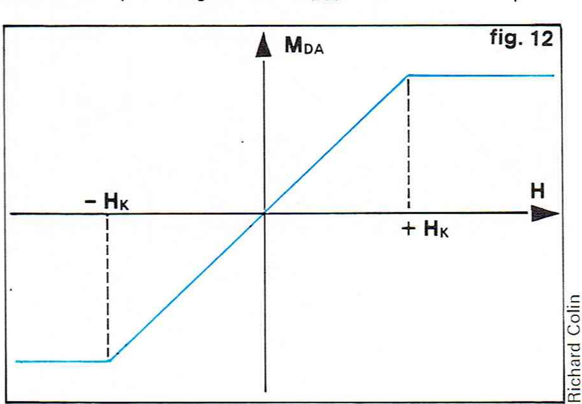



Cependant, il existe des particularités dues aux positions respectives du vecteur aimantation et du champ magnétique appliqué. Le premier cas intéressant est l'application d'un champ dans l'axe de facile aimantation (axe longitudinal). On retrouve le cycle d'hystérésis classique (*fig.* 11). Si H est très grand, le moment magnétique M est orienté suivant l'axe de facile aimantation, dans le même sens que H. Si H devient plus faible que ($-H_k$), ce moment change de signe et prend celui de $-$H. Si H croît d'une valeur négative à $+H_k$, le moment garde le signe négatif ; il ne devient positif que si H dépasse la valeur $+H_k$.

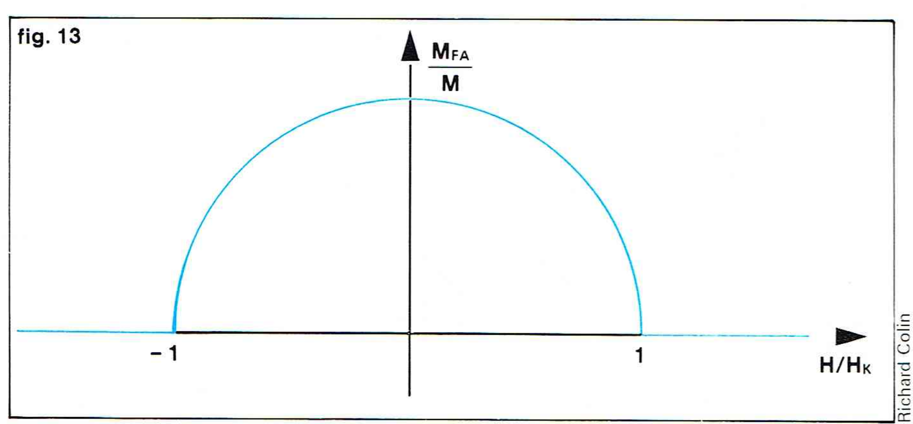
Quand on applique un champ transverse (perpendiculaire à l'axe de facile aimantation), le moment magnétique présente deux composantes : l'une parallèle à la direction de facile aimantation $\overrightarrow{M_{FA}}$, l'autre orthogonale $\overrightarrow{M_{DA}}$. Pour ce qui est de $\overrightarrow{M_{DA}}$ la relation entre $\overrightarrow{M_{DA}}$ et $\vec{H}$ est donnée par la *figure* 12. $M_{DA}$ vaut $\vec{M}$ suivant que H

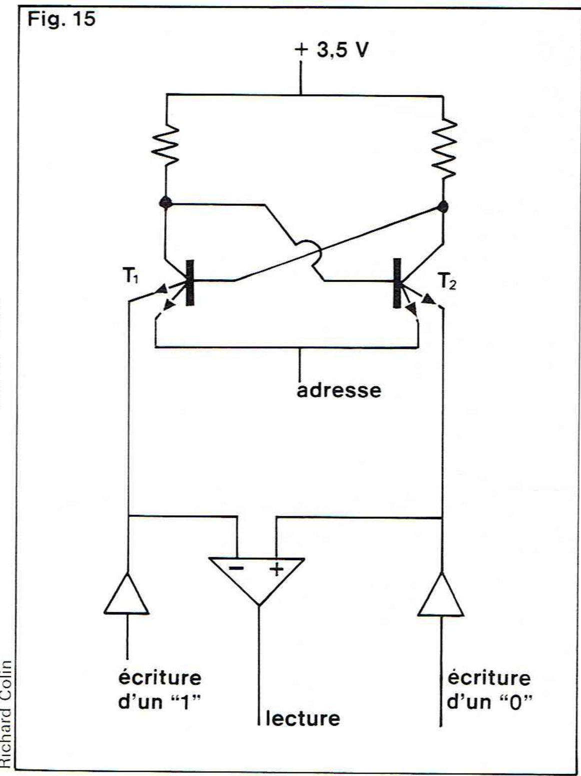
▲ *Figure 8 : schéma d'utilisation des mémoires à film magnétique.*
*Figure 9 : variation du rapport $\Phi/\Phi_d$ en fonction du rapport $H/H_k$ pour les mémoires à film magnétique mince.*
*Figure 10 : exemple de séquence de lecture-écriture dans une mémoire à film magnétique mince.*



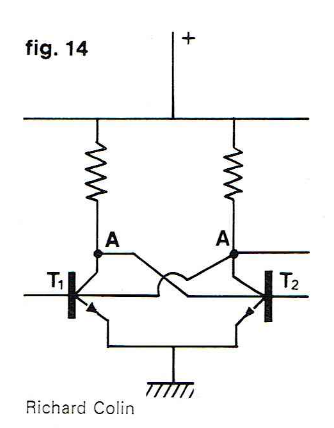




◄ *Figure 11 : cycle d'hystérésis d'un film magnétique mince lors de l'application d'un champ dans l'axe de facile aimantation.*
*Figure 12 : variation de la composante $M_{DA}$ du moment magnétique dans le film magnétique lors de l'application d'un champ transverse.*




▲▶ *Figure 13 : variation du rapport* $M_{FA}/M$ *en fonction de* $H/H_k$ *pour les mémoires à film magnétique mince.*
*Figure 15 : cellule de mémoire à base de deux transistors multiémetteurs.*
▼ *Figure 14 : schéma d'un bistable réalisé à l'aide de deux transistors* $T_1$ *et* $T_2$ *(l'un est bloqué et l'autre saturé).*




est supérieur ou inférieur à — $H_k$. Entre ces deux valeurs, $M_{DA}$ est une fonction linéaire de H. L'équation liant $M_{FA}/M$ appliqué au rapport $\frac{H}{H_k}$ est celle d'un cercle tant que le champ est inférieur à $H_k$ et supérieur à (— $H_k$). En revanche, le moment longitudinal est nul pour un champ supérieur à $H_k$ ou inférieur à — $H_k$ (*fig.* 13).

## *Les cellules de mémoires à semi-conducteur*

On peut distinguer les mémoires à lecture seule (mémoires mortes) et les mémoires à accès (mémoires vives). Les mémoires vives peuvent être divisées en mémoires statiques où l'information est maintenue tant que l'énergie est fournie, et mémoires dynamiques où l'information se dégrade et doit donc être périodiquement régénérée, c'est ce qu'on appelle « rafraîchissement ».

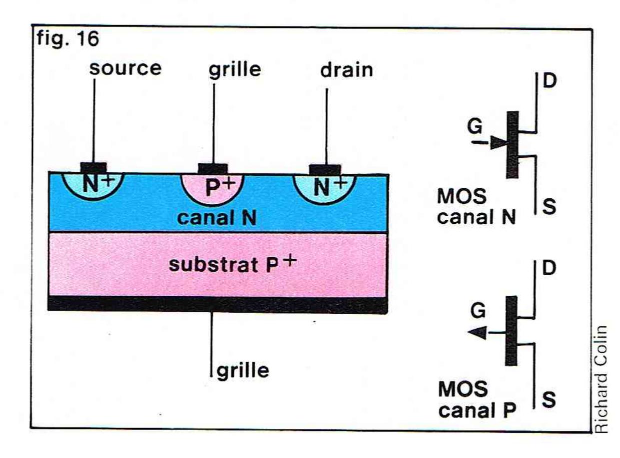
### *Élément unitaire statique bipolaire*

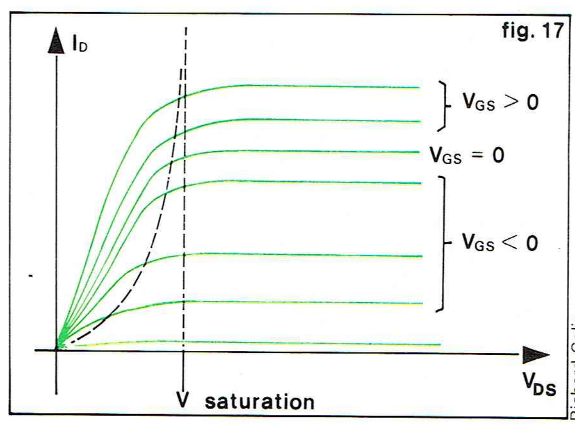
Il repose sur le schéma d'un bistable réalisé à l'aide de transistors (*fig.* 14). Sans entrer dans le détail du fonctionnement d'un transistor (qu'on suppose connu), ce circuit présente deux états : soit le transistor $T_1$ est bloqué et $T_2$ est saturé, soit l'inverse. Par transistor bloqué, on entend qu'aucun courant n'y circule et donc que la tension au point A se trouve portée à la valeur de la tension d'alimentation. En régime saturé au contraire, le transistor est traversé de courants électriques et la tension au point A est proche de la masse. Les deux états, « bloqué » et « saturé », sont les deux seuls stables, ce qui explique le nom de bistable donné à cet élément.

Un exemple d'utilisation est donné *figure* 15 par emploi de transistors multiémetteurs. Par convention, « 1 » correspond à une certaine tension positive, « 0 » à un niveau proche de la tension nulle (logique positive). L'état 1 correspond par convention à $T_1$ bloqué, $T_2$ saturé, l'état 0 à l'inverse. Pour lire, on sélectionne la cellule par le fil adresse qu'on porte à une tension de 2 volts, ce qui ne change pas l'état du bistable (il y a simplement inversion des rôles joués par les deux émetteurs des transistors). L'émetteur de $T_2$ saturé fournit du courant à une des lignes de l'amplificateur différentiel de lecture. Le choix du digit lu (1 ou 0) vient de la dissymétrie des entrées. La lecture n'est pas destructive. Pour changer l'information écrite, on agit par commande sur les deux émetteurs $E_1'$ et $E_2'$. Pour écrire « 1 », on porte $E_1'$ à 3 volts en maintenant $E_2'$ à une tension proche de la masse (500 mV), bloquant ainsi $T_1$ et saturant donc $T_2$. L'étude de Denis J. Lynes montre que cette cellule consomme 800 μW dans l'état non adressé qui est le plus dissipateur et qu'il faut 20 ns pour écrire. Cette cellule a été utilisée dans la mémoire INTEL 3101 à 64 chiffres de temps d'accès 60 ns, dissipant 6 mW/chiffre. Elle présente l'avantage d'être compatible avec les circuits DTL (Diode Transistor Logic) et TTL (Transistor Transistor Logic). Il existe des variantes au montage précédent (couplage par diode à effet Schottky par exemple).

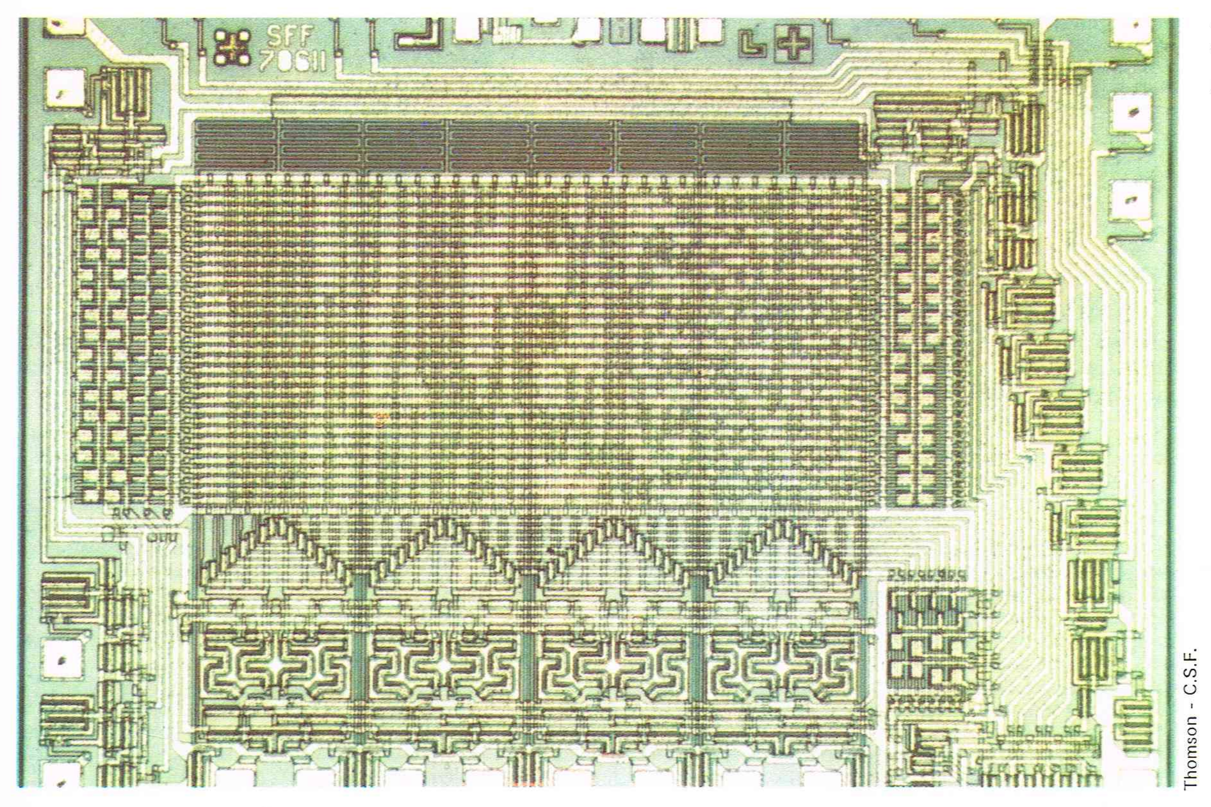
### *Mémoire statique à* MOS

Un transistor MOS (Metal Oxyde Semiconductor) est un transistor à effet de champ particulier. Le transistor à effet de champ utilise deux jonctions polarisées en sens inverse donnant un fonctionnement du même type que celui de la triode. C'est un dispositif unipolaire, car le courant n'est porté que par un seul type de porteurs. Le schéma en est donné *figure* 16. Sur un substrat fortement dopé de type $P^+$ on dépose une couche de type N, le canal, puis on forme une zone de type $P^+$ (la grille) et deux de type $N^+$ (le drain et la source). Les caractéristiques du transistor à canal N sont données *figure* 17, elles lient le courant drain $I_D$ à la tension drain-source pour



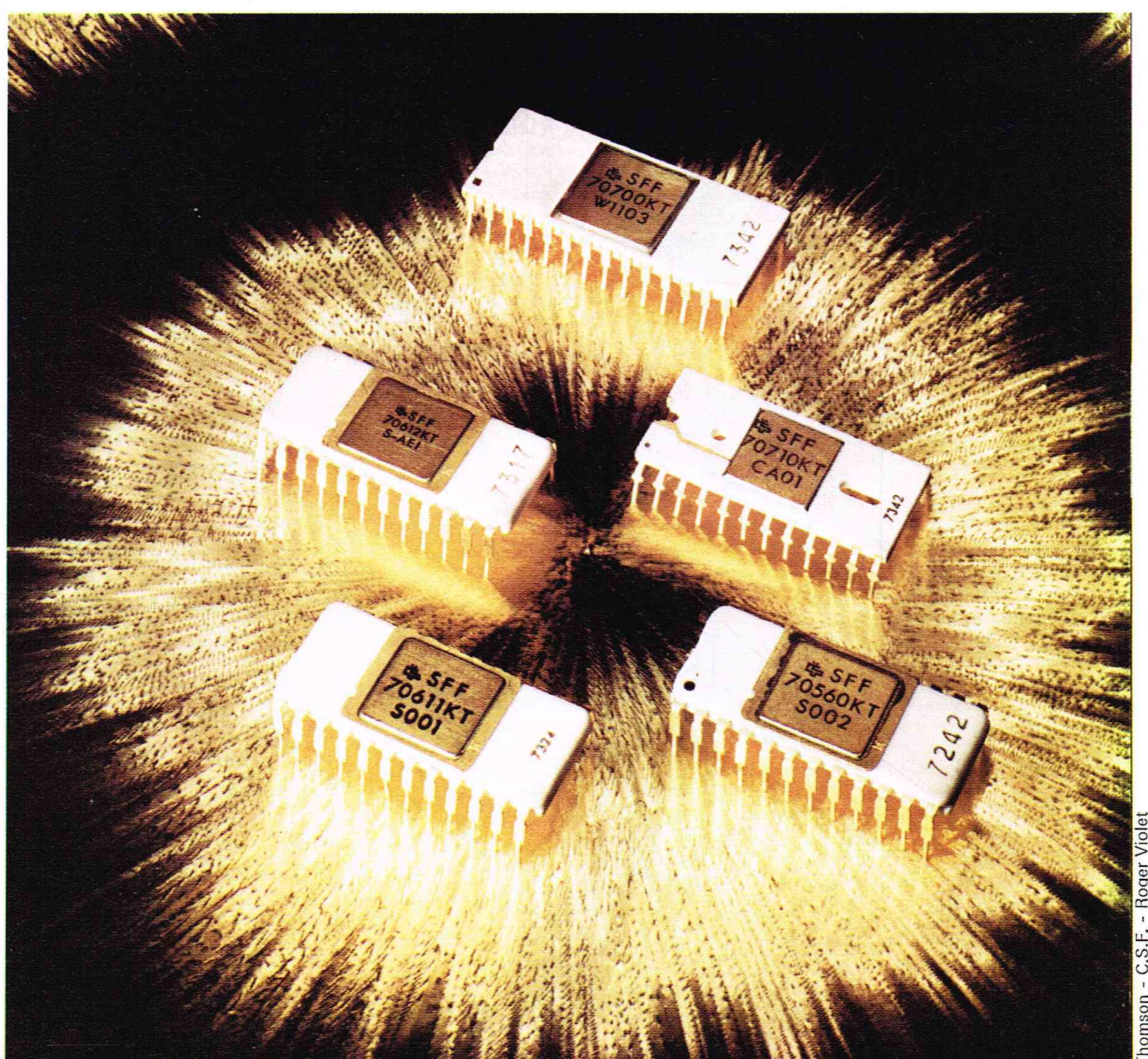




▶ *Figure 16 : schéma de principe d'un transistor* MOS *et représentation.*
*Figure 17 : caractéristiques* $I_D$ *en fonction de* $V_{DS}$ *pour différentes valeurs de* $V_{GS}$ *pour un transistor à canal* N.




Thomson - C.S.F.

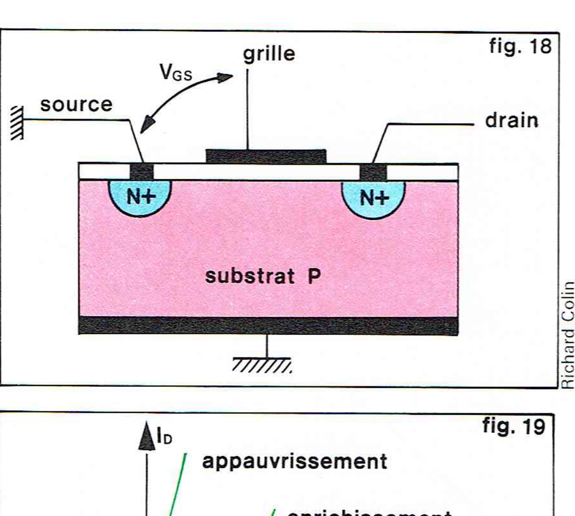
◀ *Une mémoire statique à MOS à 2 048 bits (mémoire SFF 70 611 fabriquée par SESCOSEM).*

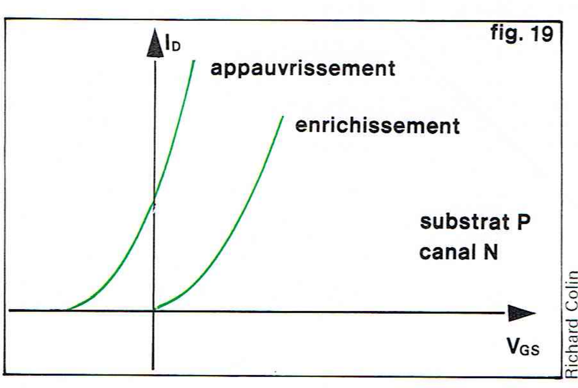


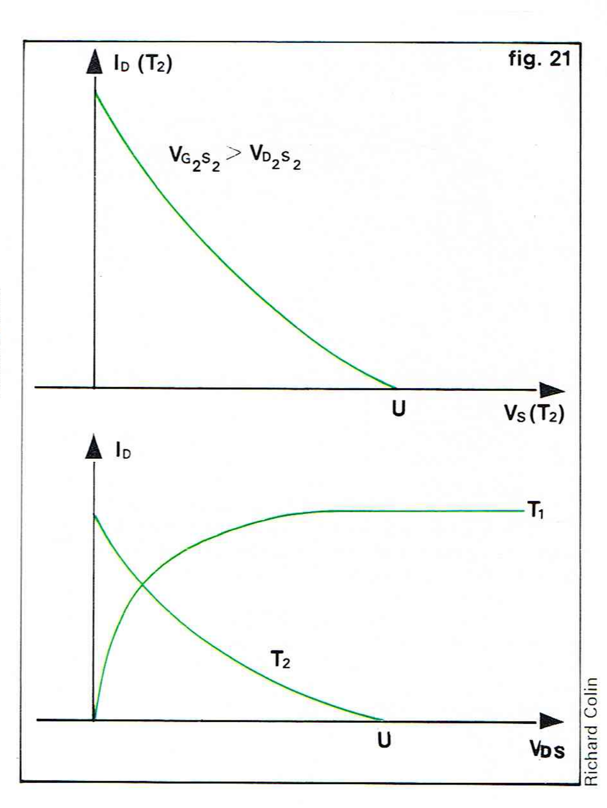

Thomson - C.S.F. - Roger Violet

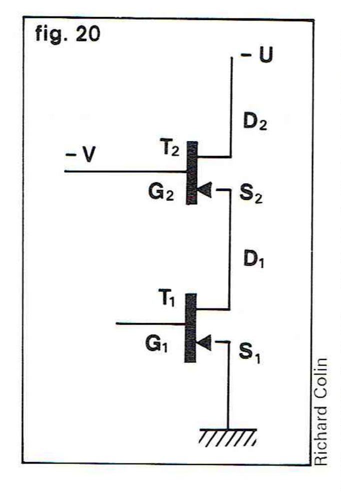
◀ *Un ensemble de mémoires statiques à MOS (fabriquées par SESCOSEM) dans leur présentation finale.*

▶ *Figure 18 : schéma de principe d'un transistor* MOS *induit par champ. Figure 19 : caractéristiques courant-drain* ($I_D$) *en fonction de la tension grille-substrat* ($V_{GS}$) *pour les transistors à appauvrissement et à enrichissement. Figure 21 :* a) *caractéristiques* $I_D$ *en fonction de* $V_S$ *dans le cas du transistor* $T_2$ *de l'inverseur de la figure 20;* b) *caractéristiques* $I_D$ *en fonction de* $V_{DS}$ *des deux transistors à* MOS *de l'inverseur de la figure 20.*




▲ *Figure 20 : représentation schématique d'un inverseur réalisé avec deux transistors avec deux transistors* MOS *(*$T_1$ *pour la commande,* $T_2$ *pour la charge).*

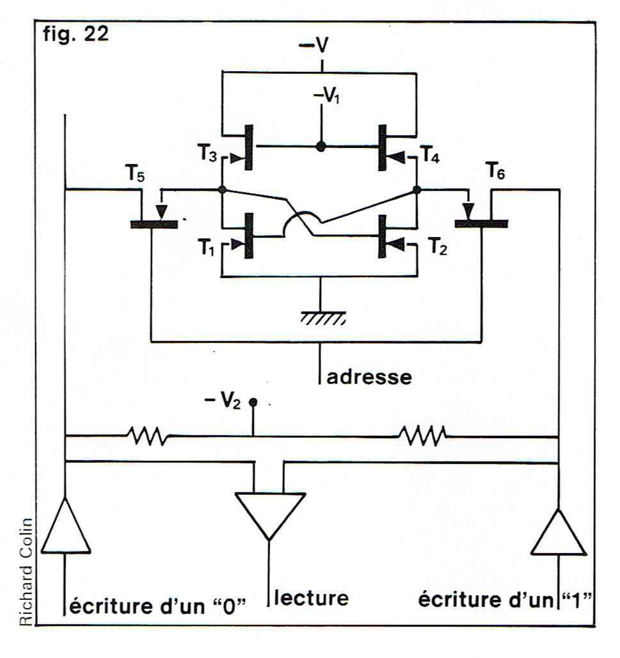
différentes tensions grille-source $V_{GS}$. Pour $V_{GS} = 0$, le courant drain augmente avec la tension $V_{DS}$ jusqu'à ce que cette dernière atteigne la tension de saturation, où le courant $I_D$ cesse de croître. Pour $V_{GS}$ négative, la résistance du canal étant plus grande, la tension de saturation est plus faible que dans le cas précédent. Si $V_{GS}$ est suffisamment négative, on bloque le transistor quelle que soit la tension $V_{DS}$ appliquée. Dans le cas où $V_{GS}$ est positive, on a un fonctionnement analogue, mais ce montage présente l'inconvénient d'avoir une impédance d'entrée faible vue de la grille, la fonction grille-canal étant polarisée en sens direct.

Le transistor MOS est un transistor à effet de champ où la grille est isolée du canal par une couche isolante. Le canal peut être créé au cours du fonctionnement (canal à effet de champ) ou au cours de la fabrication (canal métallurgique). La *figure* 18 indique la structure d'un transistor MOS induit par champ. L'application d'une tension négative entre grille et substrat entraîne une charge positive dans le substrat. Si on crée une forte charge positive entre grille et substrat, il y a création locale au voisinage de l'isolant d'un semi-conducteur N : on crée ainsi une couche d'inversion, le champ ayant induit un canal N entre source et drain. La valeur minimale de la tension grille-substrat pour cette induction est appelée tension de seuil $V_S$. En pratique, toutefois, la situation n'est pas aussi simple, parce que des charges positives sont déjà présentes : ainsi la tension seuil n'est pas toujours positive, mais peut être négative et le transistor peut se révéler conducteur pour une tension grille-substrat nulle. Les transistors MOS conducteurs pour une tension grille-substrat nulle sont dits à appauvrissement, les autres sont dits à enrichissement (la *figure* 19 donne les caractéristiques courant-drain en fonction de la tension grille-substrat pour les deux types de transistors). Nous ne développerons pas le fonctionnement du MOS à canal métallurgique, c'est-à-dire à canal fabriqué en même temps que le reste du transistor, car il est plus complexe à réaliser et plus cher.

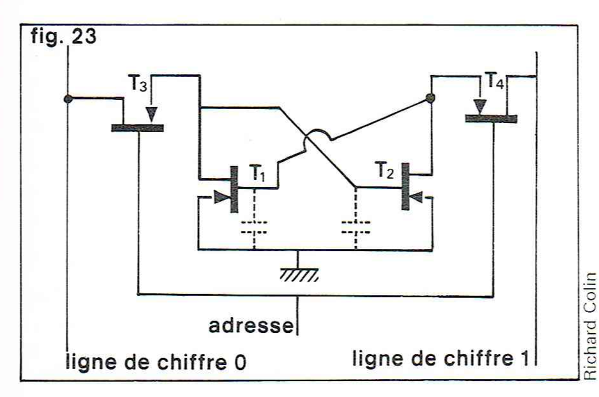
La *figure* 20 donne un schéma à deux transistors MOS qui réalise un inverseur : il y a un MOS de commande $T_1$, un de charge $T_2$. Dans le cas où la tension V est supérieure à la somme de la tension seuil de $T_2$ et de la tension U, la courbe caractéristique $I_D$ ($T_2$) fonction de $V_S$ ($T_2$) est présentée *figure* 21 : elle admet U comme abscisse à l'origine. On peut combiner les deux transistors $T_1$ et $T_2$ de plusieurs façons ($T_2$ peut fonctionner en saturation ou en régime triode...). Actuellement, on utilise des transistors à canal P, $T_1$ est à enrichissement, $T_2$ soit en régime linéaire, soit en saturation.

Parmi les avantages des transistors MOS, on peut citer : une seule sorte de porteurs ; une forte impédance d'entrée (de l'ordre de $10^9$ kΩ) ; une faible consommation ; une fabrication simplifiée pour ce qui concerne le nombre d'opérations élémentaires ; pas de caisson d'isolement. Parmi les inconvénients, en contrepartie, il est bon de donner : la sensibilité aux charges d'électricité statique, à cause de l'épaisseur faible de la couche isolante ; la fréquence maximale d'utilisation qui est inférieure à celle des transistors bipolaires ; les tensions d'alimentation nécessaires plus élevées que dans le cas des transistors bipolaires ; une technologie de fabrication critique ; une dérive temporelle et thermique des éléments.

La cellule de base d'une mémoire statique à MOS réalisée en canal P est donnée *figure* 22. Deux inverseurs sont couplés : le premier a $T_3$ en charge, le second $T_4$. $T_1$ est soit bloqué, soit passant, $T_2$ est à ce moment dans l'état contraire. Au départ, les lignes d'écriture de « 1 »




▶ *Figure 22 : la cellule de base d'une mémoire statique à* MOS *réalisée en canal* P.




et de « 0 » sont à la tension ($-V_2$). Pour lire on applique ($-V_1$) sur la connexion d'adresse, ce qui rend conducteur $T_5$ ou $T_6$, suivant que $T_2$ est bloqué ou non. Dans ces conditions, un courant traverse la ligne de chiffre « 1 » ou « 0 ». L'amplificateur de lecture étant monté en différentiel, le signe du signal de sortie permet de repérer la ligne de chiffre sur laquelle a circulé le courant de lecture. Pour écrire, on applique une tension ($-V_1$) sur la sélection d'adresse et une tension $2 V_{DS} < 0$ sur l'une des lignes de chiffre. Si c'est sur la ligne de chiffre 1 et si la cellule représente cet état ($T_2$ passant par exemple), il n'y a aucun changement; si c'est sur la ligne de chiffre 0 et si la cellule est toujours dans l'état 0, il y a blocage de $T_2$ et donc inversion de l'information contenue. Cette cellule est compatible avec les circuits DTL et TTL si le substrat est à $+5$ V. Elle équipe la mémoire INTEL 1101A de 1 256 bits avec un temps d'accès de 850 ns (dissipation de 1,5 $\mu$W/bit). Chaque cellule occupe $125 \times 125$ $\mu m^2$.

### *Mémoire dynamique à* MOS

Le schéma en est donné *figure* 23, c'est celui de la cellule précédente après suppression des transistors $T_3$ et $T_4$. Pour régénérer l'information, c'est-à-dire recharger la capacité drain-source du transistor bloqué, on effectue un « rafraîchissement » de manière périodique en opérant un cycle de lecture sans détection du signal lu. La capacité grille-substrat est rechargée par la ligne de digit correspondante après avoir rendu passants $T_3$ et $T_4$ par la sélection d'adresse ($T_3$ et $T_4$ jouent le rôle des transistors $T_3$ et $T_4$ du schéma de la cellule unitaire statique; on voit alors qu'on a reconstitué le schéma d'un bistable). On peut faire aussi des cellules de mémoire à trois transistors : circuit INTEL 1103 de 1 024 bits au temps de cycle de 580 ns, temps d'accès de 250 ns et un rafraîchissement de période 2 ms. La surface de pastille est de 3 mm $\times$ 3,5 mm. Notons qu'on est passé d'une cellule à 6 éléments à une cellule à 4 et que l'organe de mémoire n'est plus un bistable mais deux capacités.

D'autres types de mémoires existent : c'est un domaine actuellement en plein progrès technique : ainsi on sait réaliser une cellule mémoire à trois transistors.

### *Mémoire morte à* MOS

Dans ce type de mémoire, l'information est permanente et lue chaque fois que c'est nécessaire. La *figure* 24 en donne un exemple. Le stockage de l'information est commandé par l'épaisseur de l'oxyde isolant lors de la fabrication de la mémoire : épaisseur faible, tension de seuil faible; épaisseur d'oxyde grande, tension de seuil grande. La ligne d'adresse est sélectionnée par une impulsion de valeur comprise entre les deux tensions de seuil, il y a alors courant sur la ligne de chiffre suivant que le transistor devient passant ou reste bloqué. On lit ainsi le chiffre « 1 » ou « 0 ». Cette mémoire est programmée au cours de la fabrication, elle ne peut l'être par l'utilisateur.

*Figure 23 : la cellule de base d'une mémoire dynamique à* MOS.

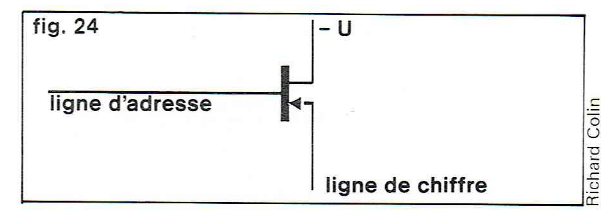
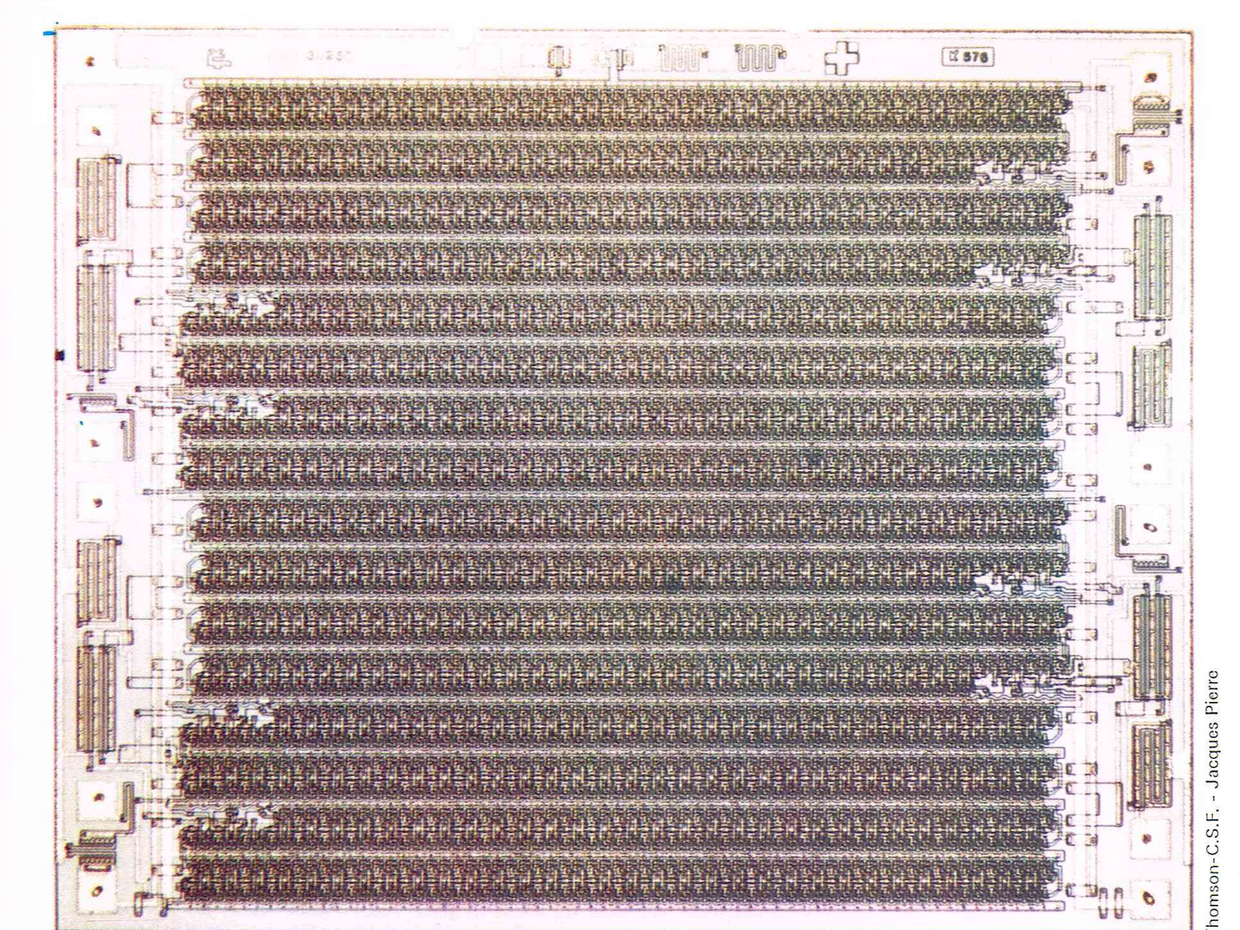
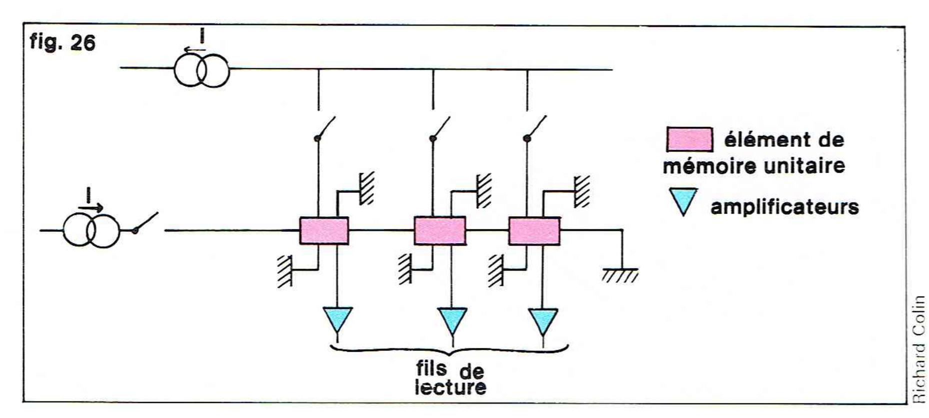
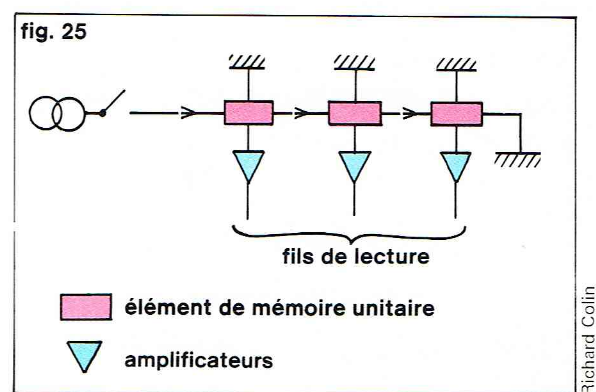


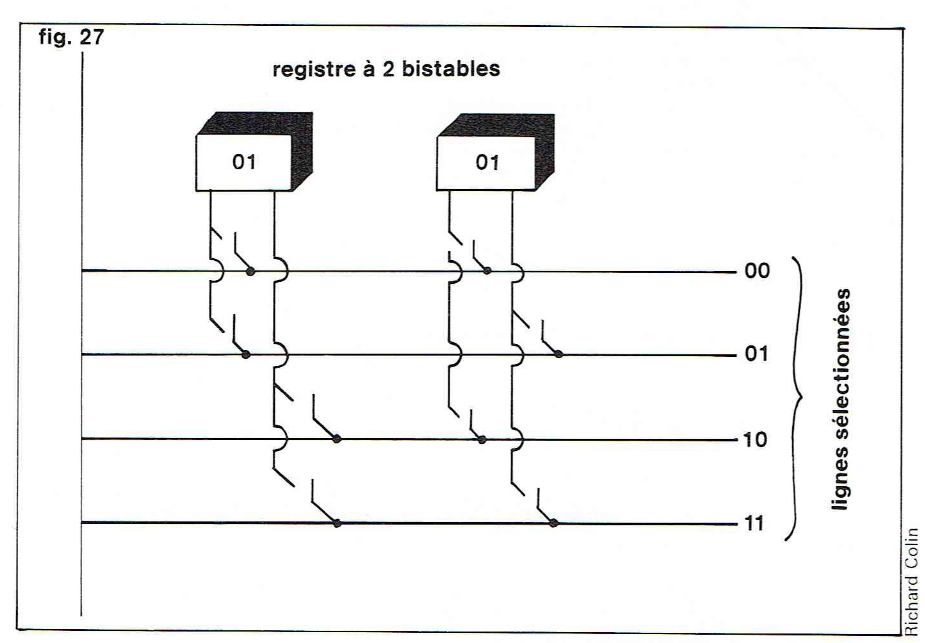

*Figure 24 : lecture dans une mémoire morte à* MOS.



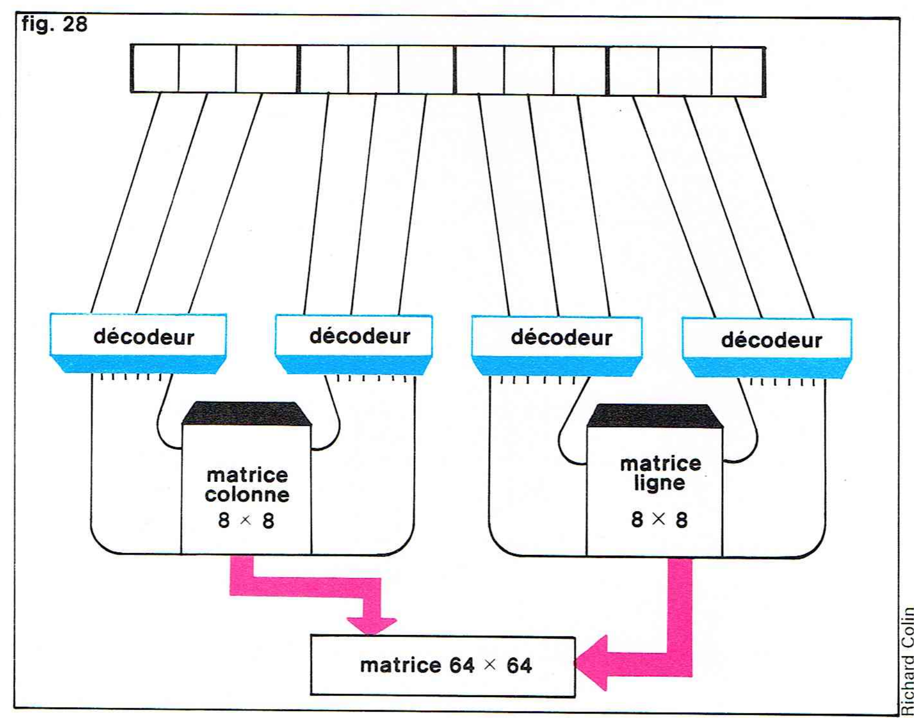

*Une mémoire dynamique à* MOS *à 1 024 bits (mémoire SFF 31402 fabriquée par SESCOSEM).*




▲ *Figure 25 : organisation de base d'une mémoire adressable pour la lecture ; il y a un fil de lecture par élément de mémoire unitaire.*
*Figure 26 : organisation de base d'une mémoire adressable pour l'écriture.*
*Figure 27 : sélection d'un mot dans une mémoire 2D.*
▼ *Figure 28 : sélection des voies lignes et colonnes lors de l'adressage d'une mémoire de 4 096 mots dans une mémoire 2D.*




## *Organisation des mémoires adressables*

Il y a deux types de mémoires adressables : les *mémoires vives* où on peut modifier l'information, les *mémoires mortes* où seule la lecture est possible. Pour décrire leur organisation, nous supposerons que les mots ont une longueur de *n* bits.

Pour lire un mot, on envoie un courant dans le fil qui passe par les *n* éléments de mémoire unitaire et on recueille les signaux correspondant aux présences de « 1 » ou de « 0 » dans *n* amplificateurs de lecture. Il y a donc un fil de lecture par élément de mémoire unitaire (*fig.* 25). Pour écrire l'information dans un mot, il faut un fil d'écriture par élément unitaire. On écrit simultanément dans les *n* éléments. Cependant, il faut que la commande sur le fil d'écriture soit différente si on veut écrire 1 ou 0. On peut utiliser le schéma de la *figure* 26. Dans un premier temps, on fait une lecture qui remet tous les éléments du mot à zéro, ensuite on envoie un courant correspondant à l'écriture d'un « 1 » dans les éléments correspondant aux positions du mot ayant cette valeur.

Nous ne nous sommes préoccupés que de la lecture d'un mot ou de son écriture. Dans une mémoire de N mots, il s'agit tout d'abord de sélectionner le mot. L'idée est de simplifier au maximum le nombre d'organes de sélection, d'amplificateurs de lecture, qui sont coûteux.

### *Sélection dans les mémoires 2D*

Nous avons vu que la position d'un mot était donnée par son adresse. Ainsi, une mémoire de 2 048 mots peut être adressée avec une adresse de longueur 11 chiffres ($2^{11} = 2\,048$). L'adresse est stockée dans le registre d'adresse. Le décodeur d'adresse doit sélectionner le fil du mot correspondant. Il a *k* entrées correspondant aux *k* positions du registre d'adresse et $2^k$ sorties, chacune reliée à un fil de mot. Un exemple en est donné sur la *figure* 27 où sont schématisés des interrupteurs fermés ou ouverts, suivant les niveaux présents dans les bistables des registres d'adresse. Généralement, ces interrupteurs sont réalisés par des diodes. Le nombre d'interrupteurs électroniques nécessaires est $k\,2^k$. La croissance est donc rapide avec la taille de la mémoire. Aussi emploie-t-on une méthode de sélection matricielle.

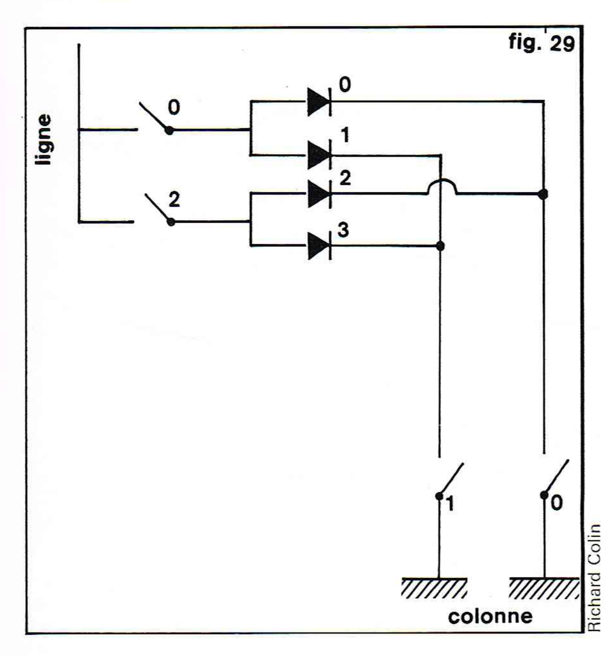
Prenons l'exemple d'une mémoire de 4 096 mots (64 × 64) et réalisons une matrice carrée de 64 « lignes » et 64 « colonnes » comprenant 4 096 portes « ET ». L'organe de sélection est constitué par la matrice : il y a 64 + 64 = 128 entrées et 4 096 sorties. Le principe est de sélectionner un élément par croisement des actions sur une ligne et une colonne (d'où l'intérêt d'utiliser les organes logiques ET).

Il reste le problème de la sélection des voies « lignes » et des « colonnes ». Pour cela, on peut utiliser aussi une solution matricielle. Les 6 premiers chiffres du registre d'adresse sont utilisés pour les « colonnes », les 6 suivants pour les lignes (*fig.* 28). Raisonnons sur les colonnes : un premier décodeur ayant comme commande les 3 premiers bistables du registre et 8 sorties ($2^3$) sélectionne une colonne d'une matrice 8 × 8, un deuxième décodeur commandé par les 3 bistables suivants sélectionne une ligne. Le résultat sera bien la sélection d'une colonne de la matrice 64 × 64. On fait de même pour les lignes. C'est la solution la plus économique (elle ne nécessite que 4 décodeurs). Les décodeurs les plus simples sont réalisés

en diodes. Un exemple de sélection matricielle est donné *figure* 29. Le mot n° 2 est sélectionné en fermant l'interrupteur de ligne n° 2 et celui de colonne n° 0. Ce système doit être doublé, puisque les courants de lecture et d'écriture n'ont pas le même sens. Il existe des systèmes où on évite deux fils (sélection à 4 diodes par mot par exemple). Actuellement, le progrès en technologie intégrée fait que le transistor ne revient pas plus cher que la diode, aussi réalise-t-on des sélections matricielles à transistors (elles présentent de plus l'avantage de pouvoir utiliser un courant de lecture important).

### *Sélection dans les mémoires 3D*

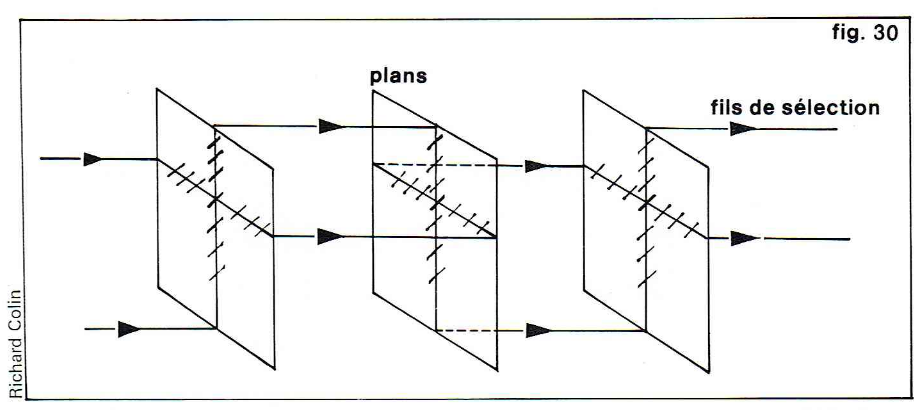
Cette méthode de sélection est très utilisée dans les mémoires à tores magnétiques. La sélection est réalisée par l'addition de deux courants qui, pris séparément, ne pourraient l'assurer. Ces mémoires sont divisées en plans.




◀ *Figure 29 : exemple de sélection matricielle dans une mémoire 2D.*

Sur un plan, il y a autant de tores que la mémoire comporte de mots (ici 4 096). Il y a surtout autant de plans que de chiffres par mot (ici 32). Un mot est donc constitué par un tore de chaque plan. On opère une sélection matricielle sur chaque plan. Pour éviter de multiplier les fils de sélection et d'avoir donc des problèmes de synchronisation, ce sont les mêmes fils pour tous les plans (*figure* 30). Un inconvénient est que chaque fil ligne et chaque fil colonne traverse tous les tores situés sur la même ligne et sur la même colonne. Il faut donc que le courant passant dans chaque tore ne soit pas suffisant, c'est l'addition des courants qui crée la sélection. Dans un tore, il passe donc : un fil de sélection de ligne ; un fil de sélection de colonne ; un fil de lecture ; un fil d'écriture (ces deux derniers fils sont les mêmes pour un plan, car on n'écrit ou on ne lit jamais deux tores d'un même plan). Il y a un amplificateur de lecture et un générateur de courant d'écriture par plan. Pour une mémoire 3D de 4 096 mots de 32 bits, il y a 32 plans de 64 × 64 tores parcourus par 4 fils, 64 + 64 générateurs de courant pour la sélection, 32 générateurs d'écriture et 32 amplificateurs de lecture.

Précisons maintenant le fonctionnement d'un tore. La lecture se fait sur le tore dont la sélection a été assurée par l'addition de deux courants, chacun de valeur $-\frac{I}{2}$, passant dans le fil de ligne et le fil de colonne. Après lecture, le tore est à 0 quel que soit son état antérieur. La lecture se fait par coïncidence de 3 courants : le courant de ligne $+\frac{I}{2}$ celui de colonne $+\frac{I}{2}$ et le courant d'écriture. Si ce dernier a pour valeur $\frac{I}{2}$, le résultat est $\left(+\frac{I}{2}\right)$, ce qui ne fait pas basculer le tore, on écrit donc « 0 ». Si le courant d'écriture a pour valeur 0, le résultat est I qui fait passer le tore à l'état « 1 ». Le fil d'écriture ne commande pas l'écriture, il l'empêche, on l'appelle aussi fil d'inhibition.




▲ *Figure 30 : dans les mémoires à tores magnétiques, les mémoires sont divisées en plans comprenant autant de tores que la mémoire comporte de mots et autant de plans que de chiffres par mots ; les fils de sélection sont les mêmes pour tous les plans.*

## *Les mémoires* ROM *et* PROM

Ce sont des *mémoires adressables à lecture seule ;* on dit aussi mémoires mortes. L'information ne pouvant donc pas être modifiée, la lecture de ce genre de mémoire doit être non destructive. Il y a deux types de mémoires à lecture seule : les mémoires ROM (Read Only Memory) dont l'écriture est assurée par le fabricant, et les mémoires PROM (Programmable Read Only Memory) que l'utilisateur peut coder, mais une fois pour toutes. Ces mémoires sont des mémoires à sélection de mots. Elles comprennent une matrice pour mémoriser l'information, un décodeur d'adresse et des organes de lecture.

L'emploi de ce type de mémoires s'est beaucoup développé ces dernières années avec la technologie du LSI (Large Scale Integration). On les trouve pour stocker des microprogrammes assurés auparavant par le logiciel (opérations courantes, gestion de la mémoire centrale, etc.), pour mémoriser des programmes correspondant au régime transitoire de fonctionnement de l'ordinateur (démarrage, pannes), pour créer des émulateurs (adaptation d'un ordinateur de façon qu'il admette les programmes d'un autre ordinateur). Les ROM peuvent être réalisées par couplage capacitif, magnétique ou résistif, ou par intégration de semi-conducteurs.

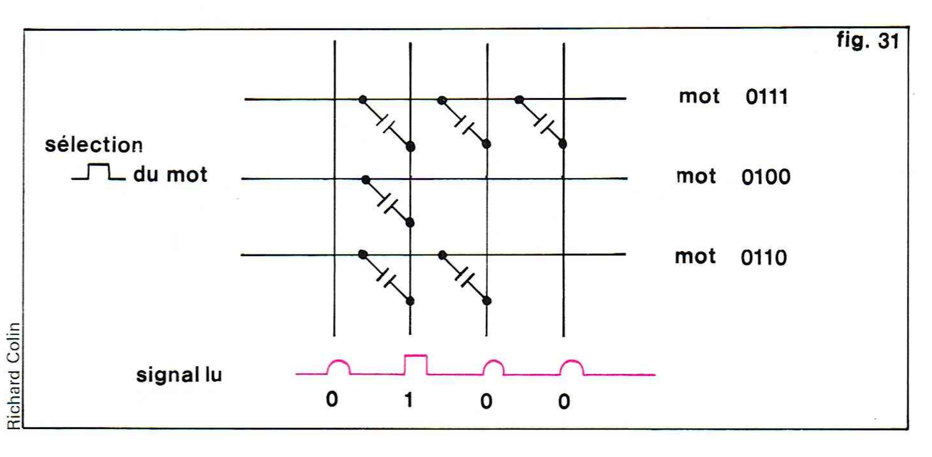
Un schéma de **mémoires ROM à couplage capacitif** est donné *figure* 31. La sélection est faite par une impulsion sur la ligne de mots choisis : quand l'impulsion est transmise par les capacités, c'est que le chiffre correspondant vaut 1. Ces mémoires sont faciles à réaliser : elles sont codées généralement par photogravure. Elles équipent certains ordinateurs de la série 360 d'IBM.

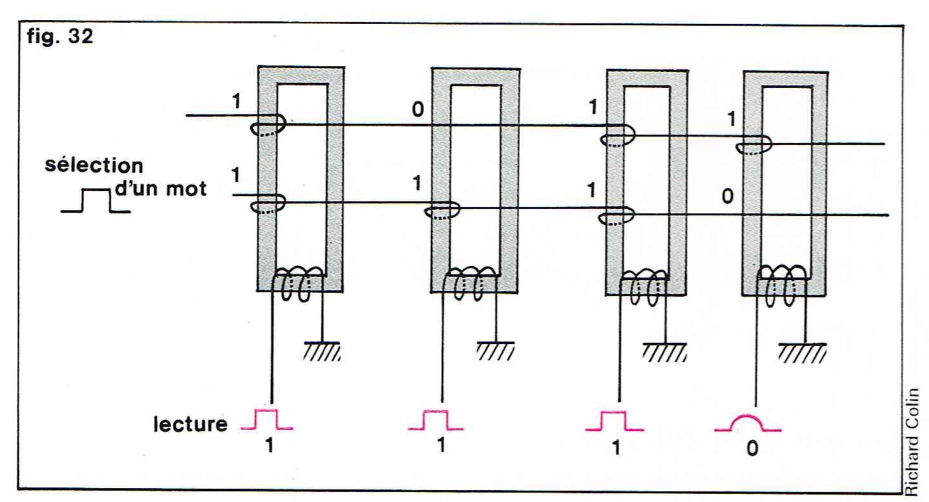
Nous décrirons les **mémoires à couplage électromagnétique** ayant un circuit magnétique par fil de digit (*figure* 32), qui sont les plus économiques. Un exemple de réalisation est la mémoire utilisée par Honeywell-Bull dans un de ses ordinateurs. On utilise une ferrite sans aimantation rémanente et sans hystérésis. Le fil de mot entoure ou non le bâtonnet, créant ou non une spire de couplage suivant que le chiffre vaut 1 ou 0. Le secondaire du transformateur constitué de cette spire et du bâtonnet est constitué par la spire de lecture. Cette mémoire est lente (la réalisation citée a un temps de cycle de 1 μs).

Dans les **mémoires à résistances,** le couplage est assuré par des résistances placées aux endroits où on a

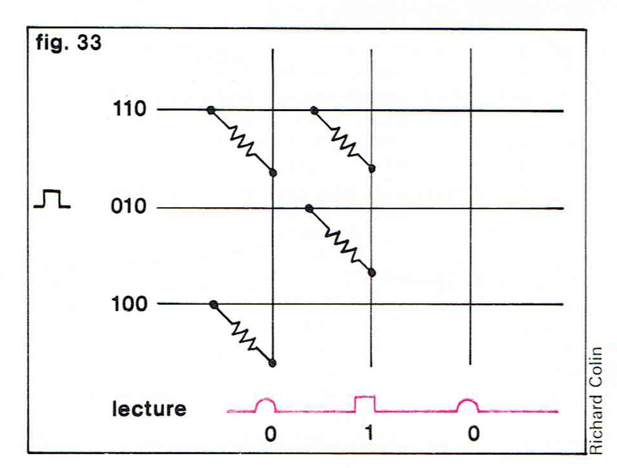


▼ *Figure 31 : mémoire* ROM *à couplage capacitif.*






▲ *Figure 32 : mémoire* ROM *à couplage électromagnétique ayant un circuit magnétique par fil de digit.*

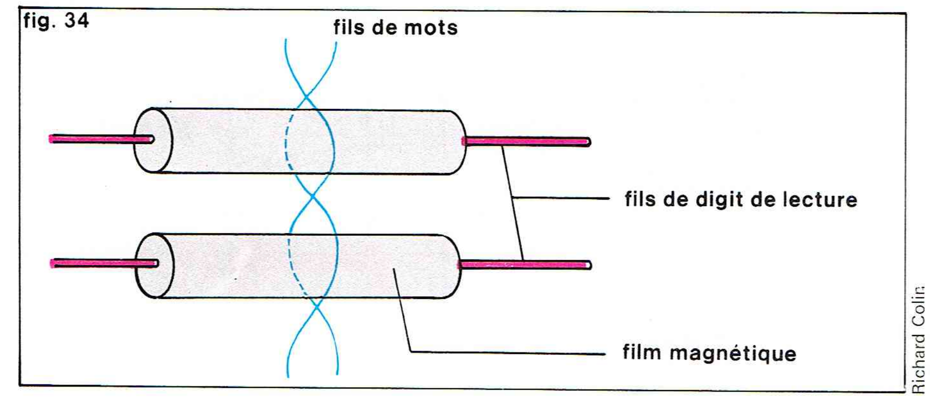



▶ *Figure 33 : mémoire* ROM *à résistances.*

voulu inscrire 1 (*figure* 33). Leurs avantages sont : la faible dispersion du signal de lecture; l'élimination des couplages parasites est simple; leur faible coût. L'inconvénient vient du fait que les résistances sont des éléments bidirectionnels et qu'il y a donc des liaisons parasites d'un fil de mot à l'autre. Ces mémoires peuvent être programmées par le fabricant ou l'utilisateur. Dans ce dernier cas, il suffit de placer des résistances partout en série avec des fusibles que l'utilisateur fait fondre. On atteint une densité de 1 bit/mm$^2$ (par exemple la mémoire INTEL 3301) de 256 mots de 4 bits.

Les technologies précédentes ne permettent pas d'atteindre une grande densité d'intégration. Actuellement, on sait réaliser des **mémoires à semi-conducteurs** telles que la mémoire et ses organes de sélection d'écriture et de lecture se trouvent sur une même pastille de silicium (1 024 bits sur une pastille de quelques mm$^2$). Les premières mémoires ROM ou PROM à semi-conducteurs ont été à transistors bipolaires. Dans le cas de mémoires ROM, le fabricant réalise les « 1 » ou « 0 » à l'aide d'un masque de métallisation (les transistors sont raccordés ou non aux fils de digit). La programmation dans le cas du PROM peut être réalisée par deux procédés. Dans le premier, chaque transistor est relié au fil de digit par un fusible que l'utilisateur peut ou non détruire pour créer des « 0 ». Le second procédé consiste à dégrader la jonction émetteur-base avec une impulsion de courant, ce qui crée un « 1 ». On réalise aussi des mémoires à semi-conducteur MOS, bien qu'ils soient plus lents que les bipolaires. Mais les mémoires MOS présentent d'autre part un encombrement réduit (1/3 de la surface est gagné), un coût de réalisation plus faible et demandent peu de courant. De plus, on sait réaliser des mémoires effaçables avec des semi-conducteurs FAMOS (Floating Gate Avalanche injection MOS) par des rayons ultraviolets ou X. C'est le cas de la mémoire INTEL 1601 qui est un circuit intégré de 2 048 éléments organisés en 256 mots de 8 chiffres.

▼ *Figure 34 : mémoire vive* RAM *réalisée par le tissage d'éléments de base composés de fils recouverts d'un film magnétique mince.*




## *Les mémoires vives* RAM *(Random Access Memory)*

On distingue les mémoires adressables à lecture destructive des mémoires à lectures non destructives. Ces mémoires du premier type sont constituées à partir de tores de ferrite ou de films magnétiques minces. Les mémoires à tores de ferrite sont les plus anciennes. On a déjà évoqué ce type de mémoires, mais rappelons qu'on peut trouver plusieurs organisations de base : l'organisation 2D ou à 2 dimensions utilisée pour des mémoires de faible capacité; pour des grosses mémoires, on utilise l'organisation 3D à 3 dimensions (2 dimensions pour la sélection et 1 pour le chiffre). Des mémoires existent aussi en organisation 2,5D (une des dimensions de sélection et la dimension du digit sont communes). Ce type d'organisation a été imposé par la fabrication de tores de plus faible dimension où on ne pouvait faire passer 3 fils. Ces mémoires sont plus rapides. Le principe de lecture et d'écriture dans les mémoires 3D a été décrit précédemment. Leur avantage par rapport aux mémoires 2D est un gain en organes électroniques interrupteurs, en nombre de circuits augmentant avec la capacité de la mémoire. Pour une mémoire 3D à N mots, il faut $4\sqrt[4]{N}$ interrupteurs; pour une mémoire 2D, il en faut $2\sqrt{N}$; il faut donc $0{,}5\sqrt[4]{N}$ plus d'interrupteurs pour une mémoire 2D que pour une mémoire 3D. Ce rapport est égal à 1 pour $N = 16$, c'est-à-dire pour une mémoire de très faible capacité. Parmi les inconvénients des mémoires 3D, on peut citer la longueur des fils (augmentation du temps de propagation), la perturbation des tores ne correspondant pas au mot sélectionné (pour lutter contre ce phénomène, on utilise un tissage particulier des tores, le MIT).

Les mémoires à film magnétique mince sont aussi des mémoires à lecture destructive. Ces mémoires sont toujours organisées par mots. On peut les réaliser soit par des films déposés sur des fils, soit par dépôt de films sur une plaque de cuivre. Dans le premier cas, les fils deviennent des fils de digit de lecture, le fil de mot est réalisé par un tissage (*fig.* 34). Lorsqu'on utilise des mémoires à films magnétiques minces, on découvre des phénomènes parasites non présents dans les mémoires à tores (parasites dus au champ magnétique terrestre, parasites par digits et mots voisins). Ces parasites sont plus importants pour les mémoires à films plans.

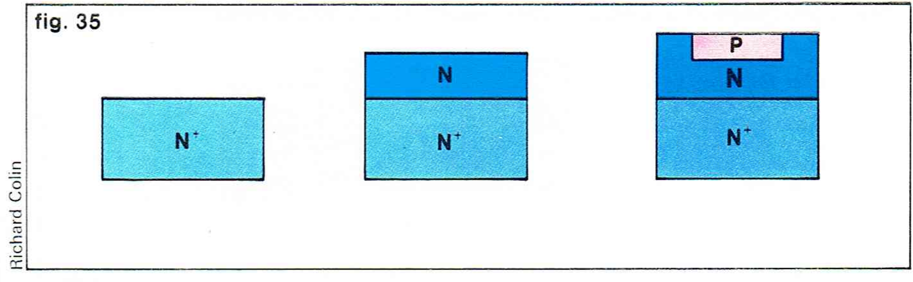
Un deuxième type de mémoires adressables modifiables est constitué des mémoires à écriture et lecture non destructives. Ce sont des mémoires à semi-conducteurs bipolaires ou à semi-conducteurs MOS. C'est la technologie des mémoires actuellement en plein essor. Par exemple, SESCOSEM fabrique en circuits intégrés bipolaires une mémoire de 64 bits (16 mots de 4 bits) dont les caractéristiques sont les suivantes : temps d'accès 40 ns, consommation 400 mW, 500 composants sur une pastille de 8,7 mm$^2$, boîtier 16 broches.

Pour des mémoires de capacité plus grande, un problème immédiat se pose. Les boîtiers standards ont 16 broches. Si la mémoire a une capacité de 256 bits, il faut 8 broches pour les adresses, 2 broches pour les tensions, 1 pour sélectionner le module et 1 pour l'écriture. Il ne reste donc que 4 broches pour les sorties et les données, donc les mots ne peuvent avoir une longueur supérieure à 2 bits. On associe alors plusieurs boîtiers pour constituer des longueurs de mots suffisantes. En

◀ *Une mémoire vive* **RAM** *à 256 bits; il s'agit d'une mémoire dynamique réalisée en technologie bipolaire par SESCOSEM.*

Thomson-C.S.F. - Gilbert Warin

▼ *Figure 35 : réalisation d'une diode avec des dopages successifs* **N** *et* **P** *à partir d'une plaquette de silicium fortement dopée.*




fait, deux caractéristiques imposent des limitations : la consommation de puissance et la surface de la pastille de silicium.

En réalité, si on diminue la puissance consommée, on augmente le temps d'accès. Une réduction de l'encombrement, c'est-à-dire une augmentation du nombre de composants sur la pastille, se fait par de nouveaux procédés technologiques : couche épitaxiale pincée par diffusion latérale par exemple, Isoplanar, isolement par gravure anisotropique du silicium, V-ATE, etc. Pour avoir des mémoires de plus grande capacité encore, il faut utiliser la technologie MOS. Avant de décrire ce type de mémoire, nous décrirons brièvement les technologies d'élaboration des transistors bipolaires intégrés.

Dans la technologie dite intégrée, au lieu d'assembler les composants (transistors, résistances, condensateurs) avec des soudures à l'étain, on diffuse des impuretés dans un bloc de silicium. L'isolement entre éléments est assuré soit par des cloisons isolantes, soit par des diodes polarisées en inverse. On part d'un bloc de silicium (diamètre environ 4 cm, épaisseur 0,22 mm) sur lequel on réalise plusieurs circuits identiques. Ces circuits sont ensuite obtenus par découpage, et on les encapsule, dans un boîtier généralement à 16 broches réalisant les connexions vers l'extérieur. La technologie utilisée est celle des transistors (planar). Le procédé de départ est l'épitaxie, que nous allons maintenant définir.

L'épitaxie permet de faire croître un monocristal à partir d'un support également monocristallin qui impose sa structure. Cette formation est réalisée soit à partir du semi-conducteur porté à haute température (1 100 °C), donc gazeux, soit à partir d'une réaction chimique en phase gazeuse. Dans la couche, on peut ensuite faire diffuser des dopants. La *figure* 35 indique ainsi la réalisation d'une diode avec des dopages successifs N et P à partir d'une plaquette de silicium fortement dopée ($10^{26}$ atomes d'impuretés par $m^3$), ce qui donnera une tension de claquage élevée : on a fait croître une couche épitaxiale de dopage moyen ($10^{22}$ atomes/$m^3$), puis on diffuse des impuretés pour créer une zone P.

Pour réaliser un **circuit intégré,** on part d'une plaquette de silicium monocristallin polie sur laquelle on dépose par épitaxie une deuxième couche de silicium. A la surface de cette couche, on forme une couche de silice isolante. A partir du dessin du circuit réalisé avec grande précision, on fait un cliché photographique noir et blanc, le masque. Sur la couche de silice, on étale une laque photosensible, qui est polymérisée par des rayons ultraviolets à travers le masque. Les parties situées sous les zones obscures du masque sont protégées et non polymérisées; on les élimine par un solvant, on élimine aussi en ces zones la silice par un décapage à l'acide. On retrouve donc en ces endroits le silicium. A travers ces « fenêtres », on dope le silicium en plaçant la plaquette dans une atmosphère gazeuse à haute température (1 200 °C).

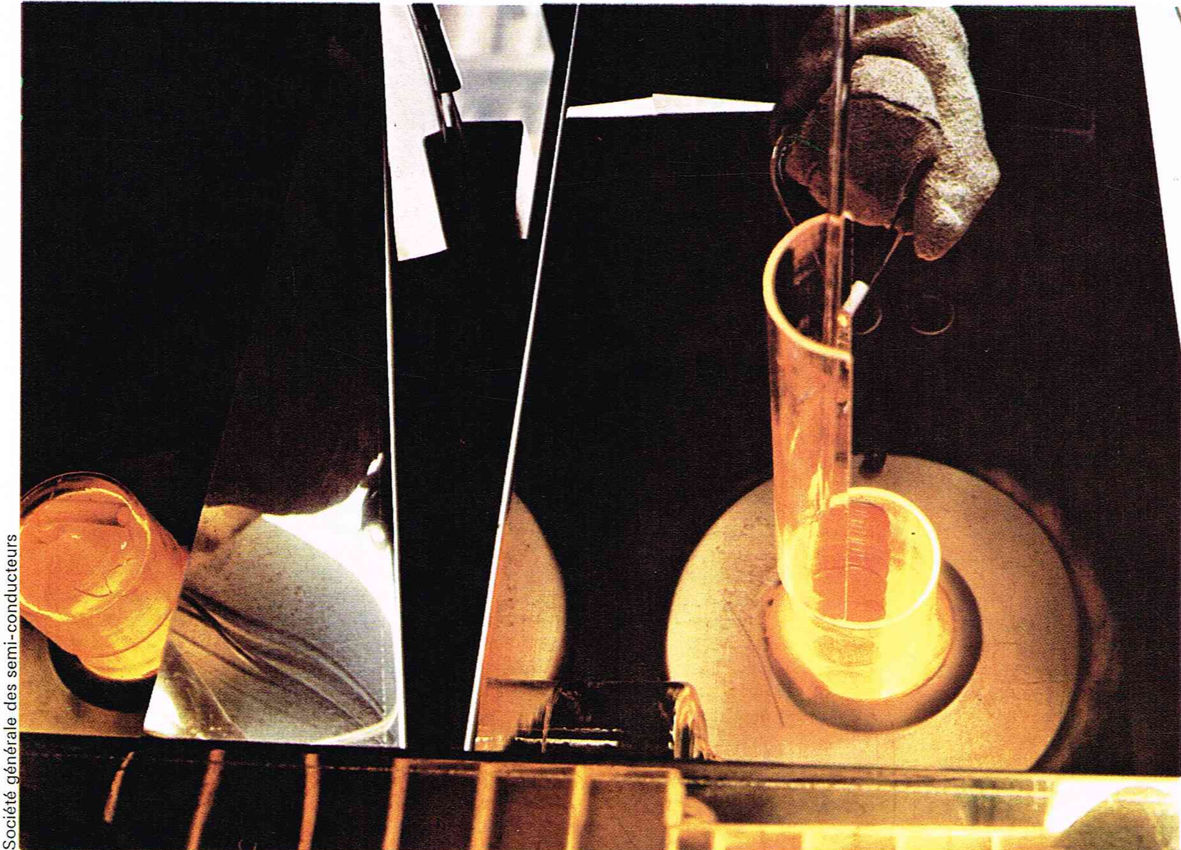
Les opérations précédentes sont répétées autant de fois que c'est nécessaire pour réaliser les différents composants (diodes, transistors, résistances, capacités). En utilisant toujours la méthode du masque, on dépose de l'aluminium sur le silicium pour assurer les connexions. Puis on découpe les différents circuits élémentaires avec une pointe de diamant (plusieurs centaines, voire un millier de circuits sont réalisés en même temps). Chaque pastille est ensuite placée dans un boîtier qui assure sa protection mécanique.

Les **résistances** sont réalisées suivant deux procédés : diffusion ou dépôt. Dans le premier procédé, on diffuse

Société générale des semi-conducteurs

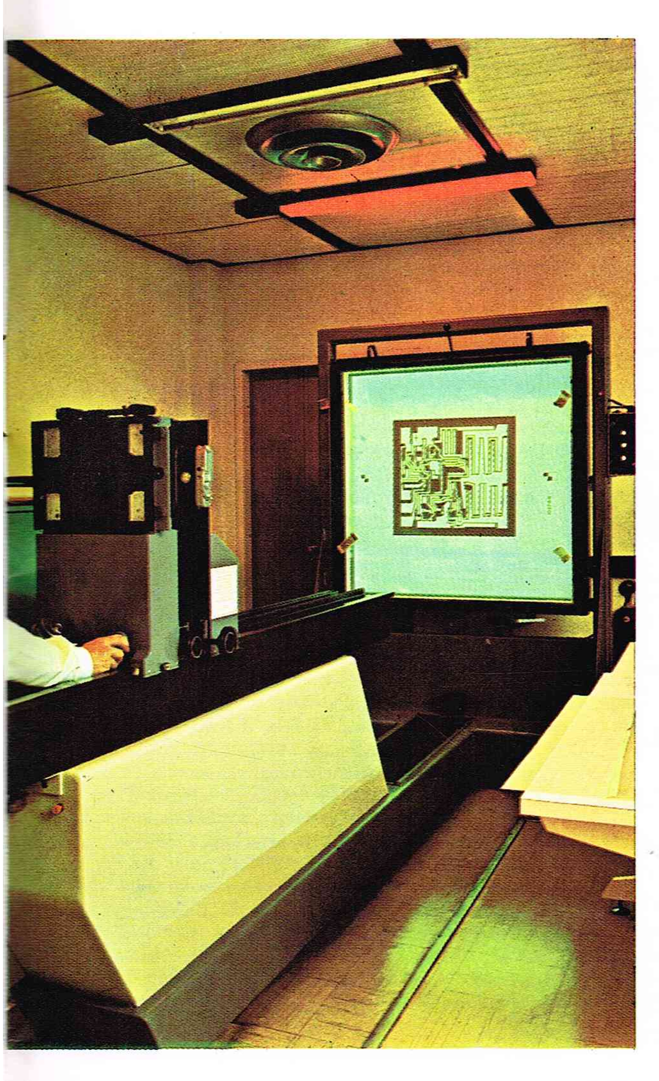
Marka

▲ *Deux étapes de la fabrication des circuits intégrés : à gauche, le dessin, quatre cents fois plus grand que le circuit, est contrôlé avec précision ; à droite, le dessin est photographié pour fabriquer un masque ; celui-ci sera ensuite réduit et appliqué sur la plaquette de silicium recouverte de silice et d'une laque photosensible.*



Société générale des semi-conducteurs

▶ *Un four d'oxydation et de diffusion utilisé pour la fabrication de semi-conducteurs par la technologie planar.*



du bore dans le substrat N de façon à réaliser une mince couche de silicium P. On fabrique une jonction PN qu'on polarise en sens inverse. Les valeurs des résistances réalisées varient de 2,5 Ω à 100 kΩ; elles diminuent avec la température, car elles sont réalisées en semi-conducteurs. Par le second procédé, on dépose du nickel-chrome sur la couche isolante de silice $SIO_2$. Avec du nickel-chrome, la valeur maximale des résistances est limitée autour de 50 kΩ : on obtient des résistances plus élevées avec du nitrate de tantale ou du palladium. Notons que le circuit réalisé ne peut alors être qualifié d'intégré.

Les **capacités** sont de deux sortes : la capacité de jonction en sens inverse, la capacité MOS. Dans le premier cas, on retrouve les inconvénients des capacités de transition (faible valeur des capacités, mauvais isolement, loi non linéaire de la capacité en fonction de la tension inverse). Donnons quelques ordres de grandeur : avec une jonction de 625 $\mu m^2$, C = 1,8 pF pour une tension inverse nulle, C = 0,8 pF pour — 5 volts, 0,54 pF pour — 10 volts. La capacité MOS est une capacité au dioxyde de silicium; c'est un condensateur dont une armature est le semi-conducteur voisin de l'oxyde, la seconde armature un film d'aluminium déposé en même temps que les connexions (*fig.* 36). Les capacités obtenues sont supérieures ou égales à 500 $pF/mm^2$, leur valeur est constante.

Les **transistors** les plus faciles à réaliser en technologie intégrée sont les transistors NPN. En effet, les transistors PNP réalisables ont un gain faible. On doit ajouter que la fabrication d'un transistor NPN intégré entraîne celle, parasite, d'un transistor PNP qu'on doit bloquer. De plus, il existe une capacité de transition collecteur-substrat variant en fonction de la tension à chaque jonction bloquée. Les diodes des circuits intégrés sont en fait des transistors montés en diode parce que la fabrication en est facile (transistors NPN).

Le monocristal étant en partie conducteur de l'électricité, on doit donc isoler les zones les unes des autres. Pour réaliser ces parois isolantes, on peut utiliser des diodes polarisées en sens inverse par le procédé EPIC ou le procédé Isoplanar. Le premier procédé présente l'inconvénient de courants inverses qui peuvent devenir gênants lorsque la température augmente, et d'une capacité de transistion importante. Dans le procédé EPIC, on grave des sillons dans le monocristal de silicium, on oxyde les parois, on fait un dépôt épitaxial de silicium polycristallin, on retourne la plaquette et on abrase jusqu'à retrouver les différents morceaux isolés. Le procédé Isoplanar est une modification du procédé d'isolement par diodes polarisées en inverse : ce procédé est coûteux.

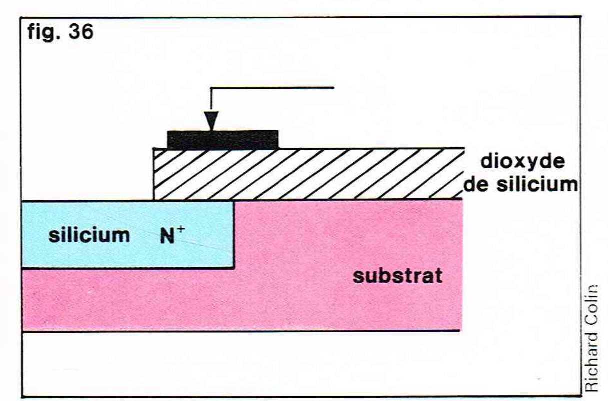
Les **mémoires MOS** prennent actuellement un essor considérable : leur densité élevée d'intégration fait que le prix de revient par bit est en constante diminution, ce qui va sans doute entraîner le remplacement des mémoires à tores par cette technologie pour les mémoires RAM à grande capacité. Ainsi, INTEL fabrique la mémoire MOS 1103 dont les caractéristiques sont les suivantes : capacité 1 024 bits, temps d'accès 300 ns, cycle minimal de 580 ns, rafraîchissement toutes les 2 ms, consommation de 400 mW, 4 200 transistors MOS sur une pastille de 3 mm × 3,5 mm, boîtier de 18 broches. Rappelons qu'un rafraîchissement est nécessaire, car la mémoire est en fait une capacité qui se décharge lentement. La lecture de ces mémoires est non destructive (cellule bistable).

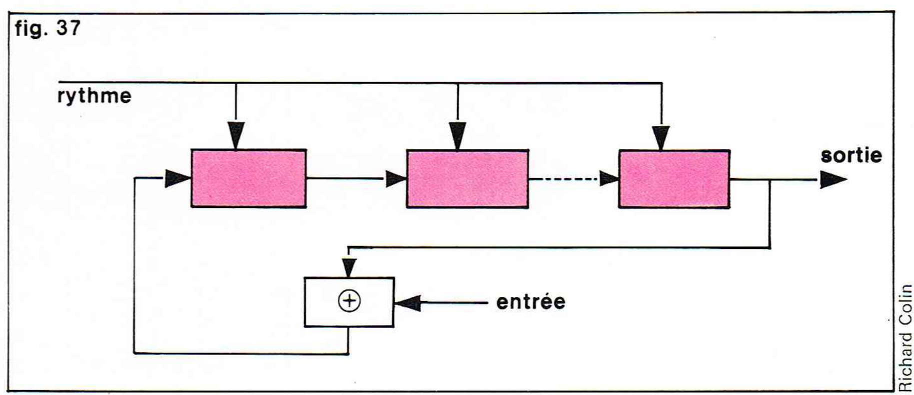
Enfin, pour les unités centrales d'ordinateur, on réalise des **mémoires RAM** de grande capacité (256, 512, 1 024, 4 096, 16 384 bits) dans des boîtiers de 16, 18 ou 24 broches. Les mémoires statiques de ce type, compatibles avec la logique TTL, sont réalisées par exemple avec des modules de base de 256 bits (256 mots de 1 bit). Les mémoires dynamiques sont en général plus complexes, généralement non compatibles avec la logique TTL sans interfaces. Leur inconvénient est en particulier le problème des « rafraîchissements ».

## *Mémoires à lecture-écriture à accès séquentiel*

Dans ces mémoires, l'information circule, est réinjectée de la sortie à l'entrée, moment où elle est lisible. Si on écarte la réalisation par ligne à retard, l'organe de principe est le registre à décalage dont le principe de fonctionne-

▼ *Figure 36 : schéma de principe d'une capacité MOS. Figure 37 : mémoire à lecture-écriture à accès séquentiel.*



| Tableau I<br>Caractéristiques de quelques technologies utilisées pour la fabrication des mémoires à semi-conducteurs | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Technologies | Temps de propagation (en ns) | * | Densité de composants (au mm²) | Densité de portes (au mm²) |
| MOS canal P<br>grille aluminium | 80 | 450 | 128 | 40 |
| MOS canal P<br>grille silicium | 30 | 145 | 256 | 85 |
| MOS canal N<br>— grille silicium<br>— à charge<br>— à appauvrissement | 12 | 36 | 300 | 100 |
| C/MOS<br>grille silicium | 12 | 0,5 | 210 | 36 |

* Produit du temps de propagation par la puissance dissipée au niveau du composant (unité pj)

▲ *Tableau I : caractéristiques de quelques technologies utilisées pour la fabrication des mémoires à semi-conducteurs (d'après* Minis et Micros, n° 32 (76)).

ment a déjà été décrit (*fig.* 37). Il se compose de *n* bistables : l'horloge H fait avancer l'information. Ce type de mémoire peut être organisé de deux façons : ou tous les mots de *k* bits sont en série, et les chiffres aussi, ou les mots sont en série et les chiffres des mots en parallèle. Leur inconvénient est un temps d'accès long, proportionnel à la capacité de la mémoire. Une autre grande différence par rapport aux RAM est due au problème de parité : si une cellule est en panne, la mémoire l'est aussi, ce qui n'est pas le cas des RAM. Les registres à décalage peuvent être réalisés en transistors bipolaires ou en transistors MOS. Ce sont ces derniers qui semblent promis à un grand avenir, en particulier les éléments à transfert de charge en surface CCD (Charge Coupled Device).

Ces mémoires sont d'une grande simplicité technologique parce que leurs interconnexions internes sont faciles à réaliser, qu'elles ont peu de connexions vers l'extérieur, que c'est le même élément qui est répété.

### *Perspective technologique*

Les mémoires à tores sont-elles condamnées ? En 1976, Modular Computer Systems (Modcomp) commercialise « Memory Plus » qui est une mémoire à performances intermédiaires entre mémoire centrale et mémoires périphériques. Le module est une mémoire à tores de 256 kilo-octets. Un périphérique « Memory Plus » se compose de un à seize modules de 256 kilo-octets et d'au moins un contrôleur. Ils sont répartis en deux fichiers de huit modules au maximum. Chaque fichier possède pour ses 8 modules sa propre alimentation, et ses interfaces sont compatibles avec la logique TTL. Pour réduire la puissance consommée, les circuits sont TTL avec utilisation de l'effet Schottky. En raison de l'emploi des tores, cet équipement a un degré de fiabilité supérieur à la plupart des autres équipements périphériques. Il combine le prix des périphériques de stockage avec la vitesse d'accès et le débit d'une mémoire centrale (maximum 4 millions d'octets par périphérique). Qui a enterré les mémoires à tores ? Une tentative de prospective a été faite dans un numéro de septembre 1976 de la revue *Minis et Micros* dont nous extrayons les lignes suivantes : La mémoire vive dynamique de 1 kilobit est apparue en 1972, en 1973 on réalisait des mémoires vives dynamiques de 2 kilobits, mais, pour des questions de rentabilité, on attendait 1974 pour des mémoires de 4 kilobits. Un système de 64 000 transistors en 1960 peut se faire aujourd'hui avec un seul circuit monolithique. Quatre raisons expliquent cette progression : diminution des dimensions des composants, augmentation de la puce, utilisation de la technologie MOS, intelligence des concepteurs. On intègre à dimension égale 64 fois plus aujourd'hui qu'en 1960. Un circuit « Large Scale Integration » a une surface 32 fois plus grande qu'en 1960. On peut caractériser une technologie par le temps de propagation et le facteur de mérite (produit du temps de propagation par la puissance dissipée au niveau du composant), et la densité de composants ou de portes intégrables sur 1 mm². Donnons quelques exemples dans le *tableau* I.

Le *tableau* II tente une perspective à l'horizon 80 à partir des mémoires en 1970.

Le développement de la technologie V/MOS et D/MOS et bipolaire de type IIL va permettre d'avoir des circuits LSI très complexes ayant les performances de la TTL, donc de trouver un nouveau champ d'application.

Enfin, citons comme perspective technologique « excitante » les mémoires à bulles magnétiques, dont on attend qu'elles débouchent sur l'industrialisation. Les bulles sont de petits domaines cylindriques dont l'aimantation est de sens contraire à celle du film mince dans lequel elles apparaissent. Voici les résultats acquis : bulle mémoire de l'ordre de 3 μ, énergie requise pour déplacer une bulle 0,04 pW, fréquence de travail 1 MHz, capacité de plusieurs millions d'octets, densité 1 000 bits/mm². La mémoire réalisée par les laboratoires Bell en 1974 a un temps d'accès de 2,7 ns, un cycle lecture écriture de 5 μs (mémoire de 5 000 000 bits sur 7 × 3 cm).

## BIBLIOGRAPHIE

ARSAC J., *les Systèmes de conduite des ordinateurs,* Paris, Dunod, 2e éd., 1970. - BOULAYE G., *la Microprogrammation,* Dunod, 2e éd., 1976. - LILEN H., *Circuits intégrés MOS et CMOS,* éditions Radio, 1976. - METZGER G., VABRE J.-P., *les Mémoires électroniques : Mémoires statiques et dynamiques ;* tome I, *les Phénomènes physiques ;* tome II, *l'Organisation des mémoires)* Paris, Masson, 1973 et 1974. - MIDDELKOEK S., GEORGE P. K., DEKKER P., *Physics of Computer : Memory Devices,* Academic Press, 1976.

| Tableau II<br>Résultats et perspectives concernant les mémoires à l'horizon 1980 à partir des données de 1970 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Années | 1972 | 1974 | 1976 | 1978 | 1980 |
| Types de mémoires | 1 024 bits dynamiques | 4 096 bits dynamiques | 16 384 bits dynamiques | 65 536 bits dynamiques | 131 072 bits ? |
| Technologies | canal P | canal N | canal N | V/MOS<br>D/MOS | ? |
| Temps d'accès (en ns) | 300 | 250 | 200 | 200 | ? |

▶ *Tableau II : résultats et perspectives concernant les mémoires à l'horizon 1980 à partir des données de 1970 (d'après* Minis et Micros, n° 32 (76)).

## L'analyse du signal

### Les fonctions aléatoires

Considérons l'expérience simple du lancer d'une pièce de monnaie. Supposons qu'un générateur associe au résultat une fonction simple. Ainsi à « face » on lie $y = \sin(\omega t)$, à « pile » $y = \sin(\omega t + \pi)$ [*fig.* 38]. On a ainsi constitué une fonction aléatoire. Plaçons-nous du point de vue d'un observateur. Ce dernier va « voir » la fonction $\sin \omega t$ ou la fonction $-\sin \omega t$ suivant le résultat de l'expérience qu'il ne peut maîtriser. Cette fonction observée n'étant pas « prévisible », elle a pour lui quelque chose d'aléatoire. Continuons à raisonner sur cet exemple très simple. Supposons que tous les résultats observables soient disponibles (dans notre cas, il n'y en a que deux) et fixons le temps $t = t_0$. A $t$ fixé, la fonction aléatoire devient une variable aléatoire. En effet, le résultat observé dépend du tirage de l'expérience. Fixons maintenant l'expérience : on observe une fonction du temps dont nous avons, ici, un modèle mathématique, mais ce n'est pas toujours le cas. Si on laisse libres les deux paramètres, temps et expérience, on obtient une fonction aléatoire. Citons maintenant deux ensembles simples de fonctions aléatoires.

Soit un tube à vide. Un bruit de fond est créé par les électrons partis de la cathode et arrivant sur l'anode, ces électrons dont le mouvement est dû à l'agitation thermique. Sur un écran d'oscilloscope cathodique, on observe un courant électrique, variant en intensité, qui est un phénomène macroscopique. En fait, ce courant résultant est la superposition des courants élémentaires produits par chaque électron :

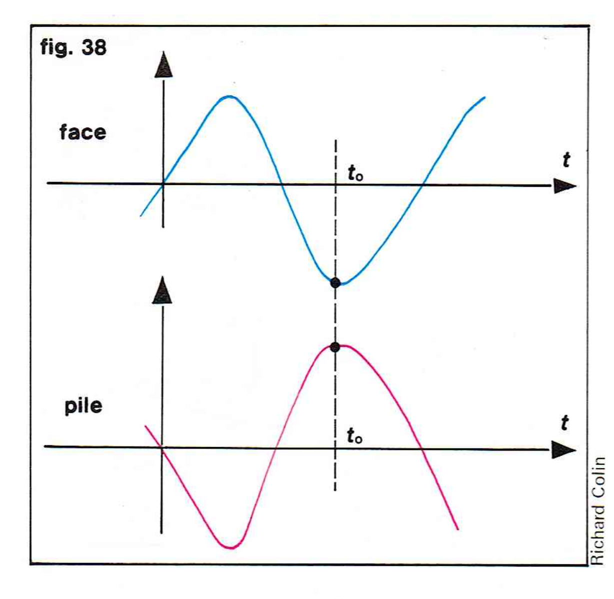
$$I(t) = \sum_k I(t - t_k),$$

$t_k$, instant d'arrivée du $k$-ième électron, est une variable aléatoire. Le courant produit dépend donc d'un nombre infini de variables aléatoires. Si on appelle « expérience » la donnée des $t_k$, on voit qu'à chaque épreuve correspond un courant $I(t)$.

Un autre exemple, pris dans le domaine biomédical, est fourni par l'électro-encéphalogramme (EEG). L'EEG est un signal électrique recueilli sur le cuir chevelu d'un individu. Il est le résultat de combinaisons complexes de signaux électriques élémentaires. Pris à une certaine heure et dans certaines conditions expérimentales, l'EEG observé présente certains rythmes remarquables ($\alpha$ par exemple). Le même individu, dans les mêmes conditions expérimentales, pourra présenter un électro-encéphalogramme très différent.

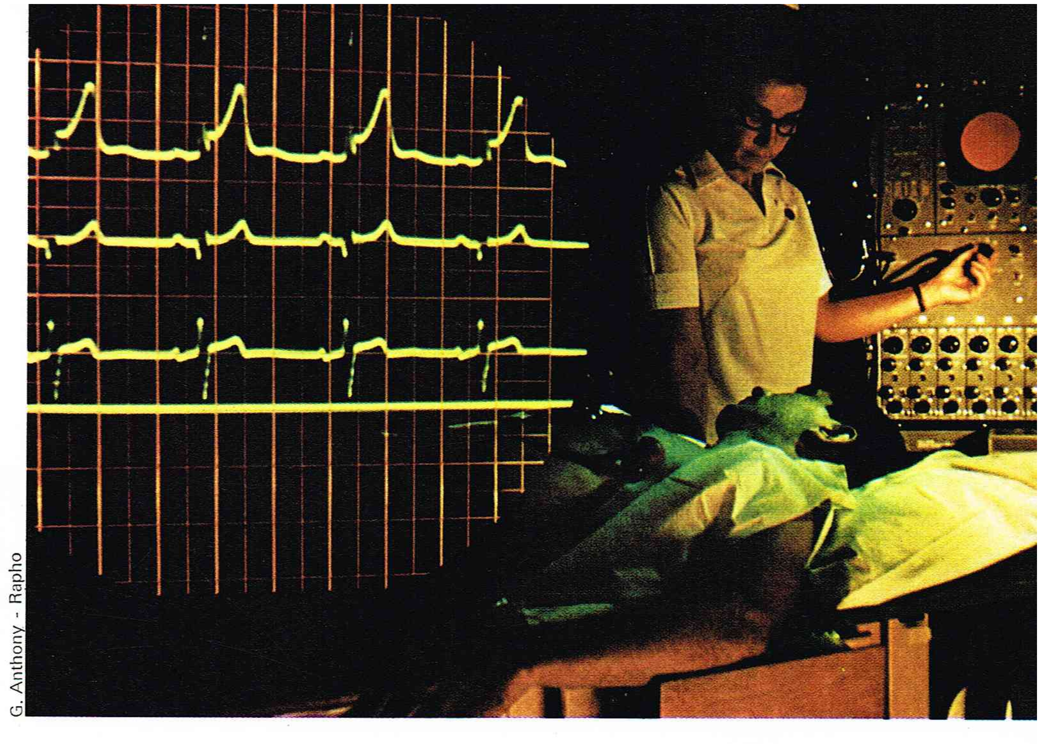
La première idée qui vient à l'esprit est de faire une description statistique d'une fonction aléatoire $x(t)$. Pour $t$ fixé, $x(t)$ est une variable aléatoire. On peut peut-être définir sa densité de probabilité $f(x(t); t)$ sous réserve de la vérification de certaines propriétés mathématiques :

$$f(x; t)\, dx = P(x < x(t) < x + dx)$$




Richard Colin

◀ *Figure 38 : fonctions simples $y = \sin(\omega t)$ et $y = \sin(\omega t + \pi)$ associées respectivement aux résultats face et pile de l'expérience du lancer d'une pièce de monnaie.*



G. Anthony - Rapho

▲ *Un exemple de signal électrique pris dans le domaine biomédical, l'électrocardiogramme ; les signaux électriques produits par les ventricules et les oreillettes sont captés par des électrodes placées sur les membres et le thorax de l'individu.*

On peut aussi définir sa fonction de répartition :

$$F_x(u, t) = P(x(t) < u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t)\, dx$$

Cependant, ces propriétés à une dimension ne sont pas suffisantes pour définir une fonction aléatoire. Plusieurs fonctions aléatoires sont susceptibles d'avoir les mêmes fonctions de répartition du premier ordre. On peut alors définir les propriétés statistiques à deux, trois, ..., $n$ dimensions. Ainsi, à deux dimensions :

$$f(x_1, x_2, t_1, t_2)\, dx_1 dx_2 = P(x_1 \leqslant x(t_1) < x_1 + dx_1, x_2 \leqslant x(t_2) < x_2 + dx_2)$$

Le problème devient vite impossible à résoudre dès que le nombre de dimensions augmente. Aussi préfère-t-on caractériser les fonctions aléatoires par des propriétés du second ordre, les moments. Il faut garder à l'esprit que cette caractérisation est une simplification qui rend la définition moins précise.

### Moments d'une fonction aléatoire

Les moments se définissent comme dans le cas des variables aléatoires. Rappelons qu'on désigne par $E(\cdot)$ l'opérateur espérance mathématique. Le moment du premier ordre ou moyenne d'une fonction aléatoire s'écrit :

$$m(t) = E(x(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)\, f(x(u))\, du$$

Le moment d'ordre $n$ :

$$M_n(t) = E[x^n(t)]$$

Le moment centré d'ordre $n$ :

$$m_n(t) = E[(x(t) - E(x(t)))^n].$$

En particulier, le moment centré d'ordre 2 s'appelle la variance $\sigma^2$ :

$$\sigma^2 = E[(x(t) - E(x(t))^2] = E(x^2(t)) - E^2(x(t))$$

Pour deux fonctions aléatoires $x(t)$ et $y(t)$, on définit les moments communs d'ordre 2 :

la cross-variance :

$$c_{XY}(t_1, t_2) = E[x(t_1)\, y(t_2)]$$

la cross-variance centrée :

$$\Gamma_{XY}(t_1, t_2) = E[(x(t_1) - E(x(t_1))(y(t_2) - E(y(t_2))]$$

l'autocovariance centrée :

$$\Gamma_{XX}(t_1, t_2) = E[(x(t_1) - E(x(t_1))(x(t_2) - E(x(t_2))]$$

Nous allons maintenant particulariser ces définitions dans un cas que nous utiliserons jusqu'à la fin de cet exposé.

Une fonction aléatoire est dite du second ordre si son second moment existe. On peut remarquer que le deuxième moment est homogène à une énergie ; donc, prendre en compte le deuxième moment revient à s'occuper de fonctions aléatoires à énergie finie. Une fonction aléatoire est dite stationnaire si ses propriétés statistiques sont indépendantes du temps. Cette propriété étant trop difficile à vérifier, on préfère parler de stationnarité du second ordre. Une fonction aléatoire est stationnaire du

second ordre si la moyenne est indépendante du temps ($m(t) = m$) et si la fonction d'autocovariance centrée ne dépend que de la différence $t_1 - t_2$. La fonction d'autocovariance centrée s'appelle alors fonction d'autocorrélation R ($t_1 - t_2$), la fonction de cross-covariance, cross-corrélation. La fonction d'autocorrélation indique le lien statistique existant entre deux instants de la fonction aléatoire. Elle sera donc maximale pour $t_1 = t_2$ (un point ne peut être plus lié qu'avec lui-même) : l'autocorrélation en 0 est la variance de $x(t)$. C'est aussi une fonction paire quand la fonction aléatoire est réelle.

Ainsi, prenons comme exemple la fonction aléatoire désignée sous le nom de signal des télégraphistes. Elle est définie comme suit :

- Elle ne peut prendre que des valeurs 0 ou 1.
- La probabilité d'avoir $k$ changements pendant un temps T est donnée (processus de Poisson) :

$$P(k, T) = \frac{(aT)^k}{k!} e^{-aT}$$

$a$ est le nombre moyen de changements par unité de temps.

- La probabilité d'avoir 0 ou 1 à l'origine est 0,5

Calculons pour cette fonction la moyenne et la fonction d'autocorrélation :

$$m = E(x(t)) = 0 \cdot \text{Prob}(x(t) = 0) + 1 \cdot \text{Prob}(x(t) = 1) = \text{Prob}(x(t) = 1)$$

$$\text{Prob}(x(t) = 1) = \text{Prob}(x(0) = 1) \cdot \text{Prob (nombre pair de changements)} + \text{Prob}(x(0) = 1) \cdot \text{Prob (nombre impair de changements)}$$

$$= 0{,}5 \qquad m = \frac{1}{2}$$

$$R_x(t_1 - t_2) = R_x(\tau) = E(x(t)\, x(t - \tau)).$$

Posons $x_1 = x(t) \quad x_2 = x(t - \tau)$

$$R_x(\tau) =$$
$$0 \cdot 0\, P(x_1 = 0, x_2 = 0) + 0 \cdot 1\, \text{Prob}(x_1 = 0, x_2 = 1) + 1 \cdot 0\, \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 0) + 1 \cdot 1\, \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 1)$$
$$= \text{Prob}(x_1 = 1, x_2 = 1)$$
$$= \text{Prob}(x_1 = 1)\ \text{Prob (nombre pair de changements de valeur de } x(t) \text{ pendant } (\tau))$$
$$= \frac{1}{4}(1 + e^{-2a|\tau|})$$

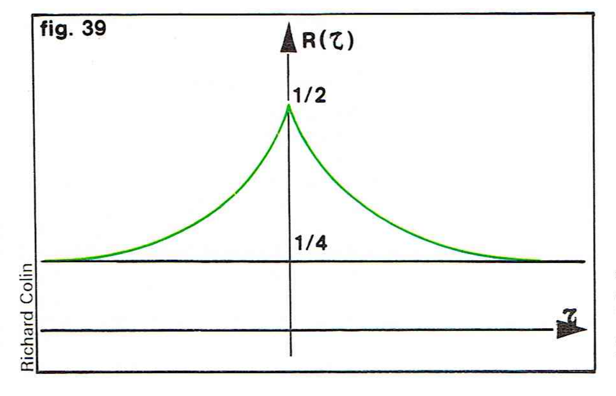
La courbe R ($\tau$) est donnée *figure* 39.

Une dernière propriété est l'ergodicité. Une fonction est dite ergodique si moyenne temporelle et moyenne probabiliste sont identiques. Dans ce cas :

$$m = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(u)\, du$$

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(u)\, x(u - \tau)\, du$$

L'accès aux moyennes d'ensemble étant impossible dans presque la totalité des problèmes de traitement de l'information, la propriété d'ergodicité est particulièrement importante pour les mesures des quantités précédemment définies. Il faut aussi constater que nous sommes allés en particularisant : fonctions aléatoires, fonctions du second ordre, fonctions stationnaires du second ordre, fonctions ergodiques. La plupart de ces propriétés ne sont pas vérifiables, du moins par des tests d'hypothèses simples et généraux. On travaillera donc la plupart du temps sous l'hypothèse de leur validité.




***Les filtres***

Nous allons rappeler brièvement la notion de filtre linéaire. C'est un système linéaire à une entrée et une sortie. Ce système peut se caractériser par une équation différentielle linéaire d'ordre $n$ reliant la sortie $s(t)$ à l'entrée $e(t)$.

$$a_n \frac{d^n}{dt^n} s(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1} s(t)}{d^{n-1}} + \ldots + a_0 s(t) = be(t).$$

A conditions initiales nulles ($y(t = 0) = 0$), la solution de cette équation est donnée par un produit de convolution

$$s(t) = \int_0^t h(t - u)\, e(u)\, du = h(t) * e(t).$$

$h(t)$ s'appelle la réponse impulsionnelle du système. Ce nom vient du fait que $h(t)$ représente la sortie du système lorsque l'entrée est « une impulsion de Dirac » $\delta(t)$ ;

$$\delta(t) = 0 \text{ pour } t \neq 0 \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)\, dt = 1.$$

Si on prend la transformée de Fourier des deux membres définie par :

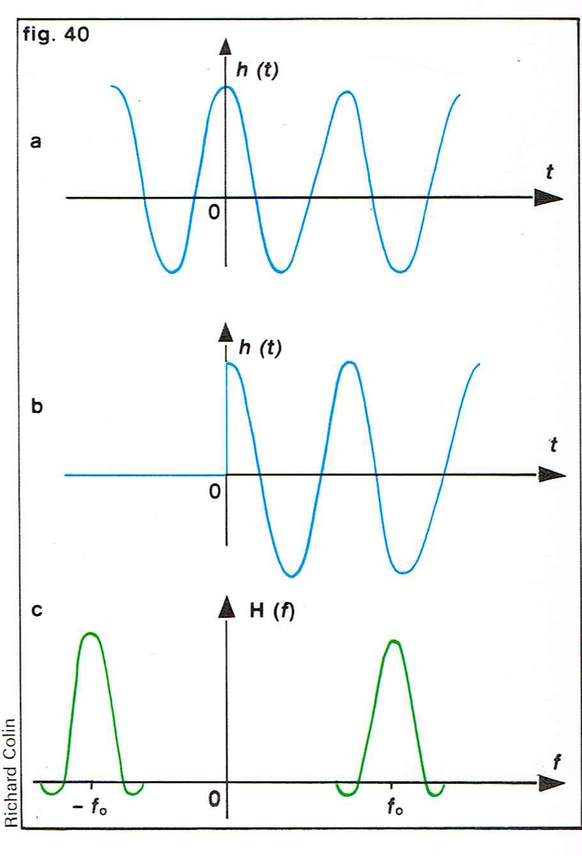
$$S(f) = \int e^{+j2\pi ft} s(t)\, dt$$
$$H(f) = \int e^{+j2\pi ft} h(t)\, dt$$
$$E(f) = \int e^{j2\pi ft} e(t)\, dt,$$

l'équation s'écrit :

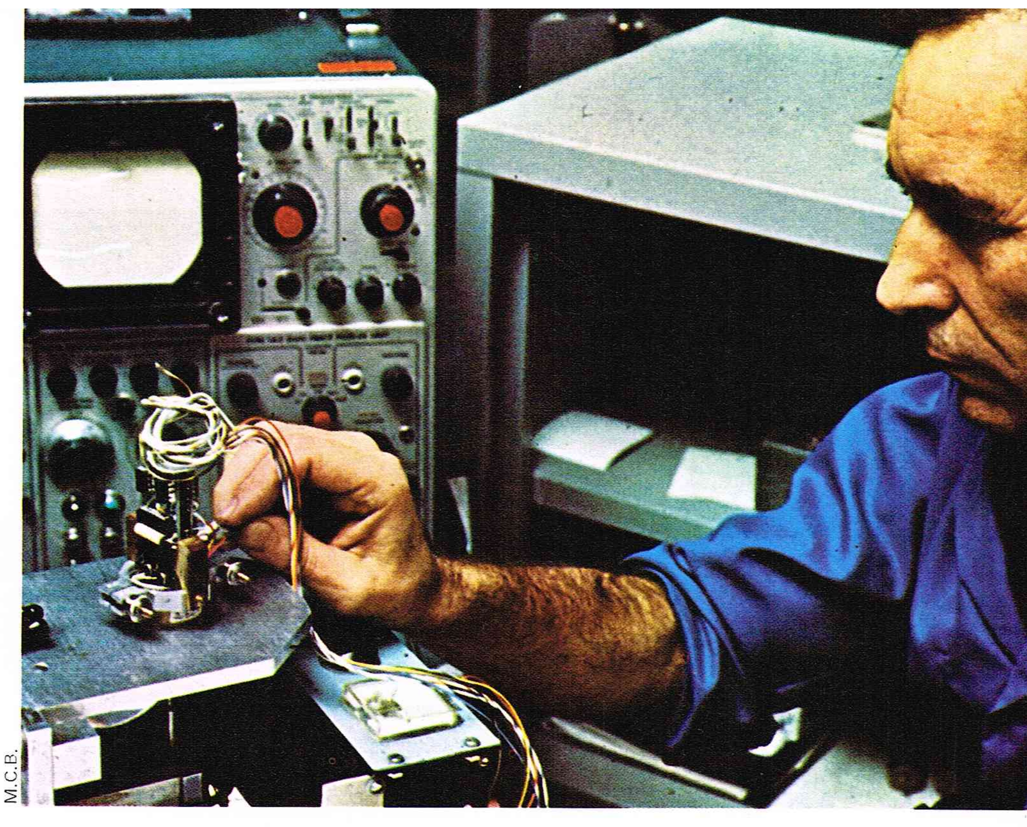
$$S(f) = H(f)\, E(f).$$

H ($f$) s'appelle la fonction de transfert.

La transformée de Fourier d'un signal temporel représente son image dans le domaine fréquentiel. Un filtre linéaire est donc déterminé si on connaît soit les coefficients de l'équation différentielle, soit la réponse impulsionnelle, ou la fonction de transfert. Cependant, n'importe quelle réponse impulsionnelle ne convient pas, encore faut-il que l'organe soit physiquement réalisable. Ainsi, un effet ne pouvant précéder une cause, la réponse impulsionnelle doit être nulle pour $t < 0$. D'autre part, la fonction de transfert H ($f$) peut s'écrire $|H(f)|\, e^{j\varphi(f)}$ où $\varphi(f)$ n'est jamais identiquement nul. Tout filtre physique introduit donc un déphasage. Par exemple, essayons de concevoir un filtre isolateur de fréquence (filtre à bande




▶ *Figure 39 : fonction d'autocorrélation R ($\tau$) du signal des télégraphistes. Figure 40 : un filtre isolateur de fréquence (filtre à bande étroite) ; a, $h(t) = \cos 2\pi f_0 t$ ; b, $h(t) = 0$ pour $t > 0$ ; c, fonction de transfert H ($f$) correspondant à b.*



**▲ *Ajustage et contrôle du signal de sortie électronique d'une voie de codeur de position à l'aide d'un oscillographe.***

M.C.B.

étroite). Sa fonction de transfert étant une impulsion de Dirac en $f = f_0$, la réponse impulsionnelle s'écrit $\cos 2\pi f_0 t$ (*fig.* 40a). Cette réponse correspond à un filtre non réalisable physiquement; aussi, prenons $h(t) = \cos 2\pi f_0 t$ pour $t > 0$ et $h(t) = 0$ pour $t < 0$ (*fig.* 40b). Dans ces conditions, la fonction de transfert H $(f)$ est indiquée *figure* 40c. Les raies ont été remplacées par des plages de largeur non nulle, et le filtre réalisable n'est pas un véritable isolateur de fréquence. Aussi retrouve-t-on l'éternel compromis du concepteur : la réalisabilité entraîne fréquemment des baisses des performances exigées.

***Analyse spectrale***

De même qu'on peut étudier les processus déterministes dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel, de même aux notions de fonctions de corrélation va correspondre un traitement fréquentiel. Raisonnons d'abord sur le cas déterministe. Dans la plupart des problèmes, on désire connaître les propriétés du signal de sortie d'un système lorsque l'entrée est connue. Dans le cas linéaire, nous avons vu qu'il suffisait de connaître la réponse impulsionnelle ou la fonction de transfert du système. Dans le cas non linéaire, les calculs deviennent rapidement compliqués, aussi a-t-on recours à une approximation linéaire du système. Pour cela, il est intéressant de décomposer le signal $x(t)$ complexe en une somme finie ou infinie de signaux plus simples

$$x(t) = \sum_i a_i x_i(t).$$

Une idée simple est d'utiliser les séries de Fourier si $x(t)$ est limité à $T_0$

$$x(t) = \Sigma e_i \, e^{jnw_0 t}$$

où $$e_i = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} x(t)\, e^{-jnw_0 t}\, dt, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Si le signal $x(t)$ a une énergie finie, il y a convergence, en moyenne quadratique vers $x(t)$, de la somme finie au niveau N. Une propriété très importante est donnée par l'égalité de Parseval : la somme des carrés des coefficients $e_i$ est égale à l'énergie du signal sur $T_0$. Lorsque $T_0$ devient infini, on utilise la transformée de Fourier définie par

$$X(f) = \int x(t)\, e^{-2\pi jft}\, dt$$

(il faut, pour l'existence de cette intégrale, que $x(t)$ soit de carré intégrable). Nous ne reviendrons pas sur les propriétés de cette transformée développées dans d'autres parties de cet ouvrage.

Il existe une propriété comparable à l'égalité de Parseval pour les séries de Fourier : l'énergie du signal sur $(-\infty, +\infty)$ est égale à l'intégrale sur $(-\infty, +\infty)$ du carré du module de sa transformée de Fourier X $(f)$. Il est d'usage d'appeler « spectre d'amplitude » la fonction $|X(f)|$. Remarquons cependant que $|X(f)|$ ne précise pas de manière unique $x(t)$, puis qu'il manque la notion de phase. En ce qui concerne les fonctions aléatoires, l'analyse spectrale représente l'outil fondamental de l'étude et de la synthèse des systèmes dans des domaines aussi divers que les techniques radar, les télécommunications, le diagnostic médical, etc.

On dit qu'une fonction aléatoire stationnaire est périodique de période $T_0$ si sa fonction d'autocorrélation est périodique de même période. Soit $x(t)$ un tel exemple de fonction aléatoire qu'on développe en série de Fourier :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k\, e^{-jkw_0 t}$$

avec $$\omega_0 = \frac{2}{T_0}.$$

$\omega_0$ et $k$ étant déterministes, nous considérons le caractère aléatoire donné par l'ensemble des paramètres $c_k$. On peut démontrer que ces variables aléatoires ne sont pas correlées, c'est-à-dire que $E(c_k c_j) = 0$ pour $j \neq k$ et que $E(|c_k|^2) = a_k$, $a_k$ étant le coefficient du développement de Fourier de la fonction d'autocorrélation

$$R_X(\tau) \qquad \text{de } x(t).$$

$a_k$ représente donc la puissance moyenne au sens statistique de $x(t)$ pour la fréquence $kf_0$. On peut alors définir, par analogie avec le cas déterministe, une densité spectrale de puissance :

$$S_x(f) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k \delta(f - kf_0)$$

$$\text{où } \delta(f - kf_0) = 0 \quad \text{pour } f \neq kf_0$$
$$= 1 \quad \text{pour } f = kf_0$$

et $$a_k = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} R_x(\tau)\, e^{-jk\omega_0\tau}\, d\tau.$$

Dans le cas général d'un processus stationnaire du second ordre, on définit la densité spectrale de puissance par la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation :

$$S_X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(T)\, e^{-j2\pi fT}\, dT$$

et réciproquement :

$$R_x(T) = \int S_X(f)\, e^{+j2\pi fT}\, df$$

Une autre représentation permet de montrer l'importance de la densité spectrale de puissance. Limitons le processus à 2 T unités de temps $(-T, +T)$, c'est-à-dire créons

$$x_T(t) = x(t) \qquad -T < t < +T.$$

$x_T(t)$ a en général une transformée de Fourier que nous notons $X_T(f)$. D'après l'égalité de Parseval, la puissance moyenne du signal dans l'intervalle $(-T, +T)$ peut s'écrire :

$$\frac{1}{2T}\int_{-T}^{+T} |x(t)|^2\, dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2T} |X_T(f)|^2\, df$$

$\dfrac{|X_T(f)|^2}{2T}$ représente donc la densité spectrale de puissance dans l'intervalle $[-T, +T]$. $|X_T(f)|^2$ est aléatoire, on définira alors la densité spectrale moyenne par :

$$E\left(\frac{|X_T(f)|^2}{2T}\right)$$

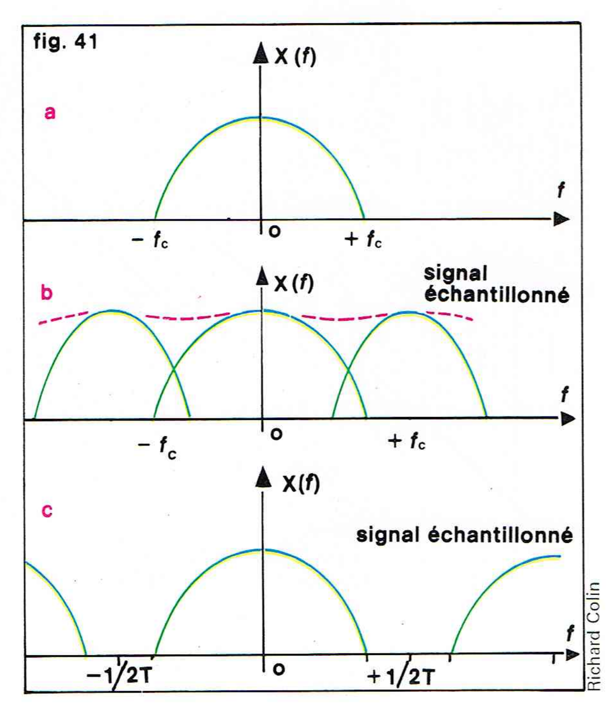
On peut montrer que, sous certaines conditions de convergence, la limite lorsque T tend vers l'infini de cette quantité est ce que nous avons appelé densité spectrale de puissance $S_x(f)$. Autrement dit, si certaines conditions mathématiques sont respectées, la densité spectrale de puissance est la limite pour un temps d'observation infini de la valeur moyenne de la densité spectrale de puissance sur un temps fini.

A titre d'exemple, la densité spectrale de puissance du signal des télégraphistes précédemment défini est

$$\frac{1}{4}\delta(f) + \frac{1}{4}\frac{a}{a^2 + \pi^2 f^2}$$

($\delta(f)$ est la distribution impulsion de Dirac).

▶ *Figure 41 :*
*a, signal à spectre borné; b, spectre du signal échantillonné pour une période d'échantillonnage* $T > \frac{1}{2 f_c}$; *c, spectre de signal échantillonné* $T < \frac{1}{2 f_c}$.




Une fonction aléatoire très utilisée est celle qui est appelée « bruit blanc » *(white noise)*. On définit un bruit blanc comme un processus aléatoire dont la densité spectrale de puissance est constante quelle que soit la fréquence $S_x(f) = K > 0$. La fonction d'autocorrélation transformée de Fourier inverse est alors

$$R_X(T) - K\delta(T),$$

c'est-à-dire une impulsion de Dirac de surface K en 0. Cela veut dire que la valeur de $x(t)$ n'est pas correlée avec une autre valeur $x(t + T)$ quel que soit T positif. C'est donc un processus totalement imprévisible, puisque la valeur présente ne donne aucune information sur l'avenir. Ce nom de bruit blanc a été donné par analogie avec le nom de lumière blanche. En effet, la densité spectrale de puissance a une valeur non nulle pour toutes les fréquences, et la « lumière blanche » est une composition de toutes les raies du spectre. Un bruit blanc est une entité mathématique, mais n'a aucune réalité physique. En effet, on sait que l'énergie moyenne de $x(t)$ $E((x(t))^2)$ est égale à l'intégrale du spectre $S_X(f)$ pour toutes les fréquences. Un bruit blanc aurait donc une énergie infinie ! Aussi rencontre-t-on plutôt, dans les observations physiques, des bruits à « bande étroite », c'est-à-dire le résultat théorique du passage d'un bruit blanc dans un filtre passe-bande. La densité spectrale de ces bruits est constante dans un certain domaine, nulle ailleurs :

$$S_X(f) = K \quad |f| < f_c$$
$$= 0 \quad \text{ailleurs.}$$

La fonction d'autocorrélation d'un bruit à bande étroite s'écrit :

$$R_X(T) = \frac{2K}{\pi T} \sin(\pi T(2 f_c)).$$

Enfin, pour clore ce paragraphe, signalons l'utilisation de la densité cross-spectrale de puissance. $S_{XY}(f)$ se définit comme la transformée de Fourier de la fonction de cross-corrélation centrée. Si $S_X(f)$ est toujours réelle et positive, $S_{XY}(f)$ présente une partie réelle et une partie imaginaire : on la caractérise donc par un module et une phase.

## *Échantillonnage*

Dans de très nombreux cas, et en particulier lorsqu'on utilise des méthodes numériques de résolution, on ne traite pas directement les signaux continus fournis par les capteurs de mesure, mais on procède à un échantillonnage : on n'observe pas alors ces signaux de manière continue, mais à certains instants seulement. En général, cet échantillonnage est périodique, c'est-à-dire qu'on lit l'information toutes les $k \cdot T$ unités de temps : $x(t)$ est transformé en une suite d'impulsions $x(nT)$.

Dans le cas de signaux déterministes, il convient de calculer la période T d'échantillonnage de façon à perdre le moins possible d'information sur le signal, c'est-à-dire de façon que sa reconstruction éventuelle soit la plus conforme possible. Pour déterminer cette fréquence d'échantillonnage, il faut calculer le spectre, la transformée de Fourier, du signal échantillonné. Si $X(f)$ est la transformée de $x(t)$, la transformée du signal échantillonné est

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} X\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

La transformée de Fourier de $x(t)$ échantillonné est donc obtenue en faisant la somme d'une infinité de fonctions, chacune d'elles étant la transformée de $x(t)$ mais décalée en fréquence de $\frac{k}{T}$.

Cela va nous permettre de donner le théorème de Shannon. Dans le domaine temporel, il existe une infinité de fonctions passant par les points $x(nT)$. Plaçons-nous alors dans le domaine fréquentiel et considérons un signal à spectre borné, c'est-à-dire

$$X(f) = 0 \text{ pour } f > f_c \text{ ou } f < -f_c \text{ (fig. 41a).}$$

La *figure* 41b indique le spectre du signal échantillonné pour une période d'échantillonnage T telle que $T > \frac{1}{2 f_c}$. Nous avons indiqué chaque composante et leur somme. Pour retrouver un signal ressemblant à $x(t)$, il faudrait faire passer le signal échantillonné dans un filtre passe-bas éliminant toute composante supérieure à $f_c$, composantes introduites par l'échantillonnage. Dans le cas de la figure, par le fait du recouvrement des composantes élémentaires, on ne retrouvera pas $x(t)$. Au contraire, si le spectre de $x(t)$ est nul au-delà de la fréquence $\frac{1}{2T}$ (*fig.* 41c), il n'y a pas recouvrement et un filtre passe-bas (c'est-à-dire une intégration) peut reconstituer le signal. On peut alors donner l'énoncé du théorème de Shannon. Si un signal a un spectre d'énergie nul pour les fréquences supérieures à $f_c$, on peut l'échantillonner sans perte d'information à une fréquence égale ou supérieure à $2 f_c$. En fait, nous avons fait tout le raisonnement sur un filtre passe-bas idéal pour reconstituer le signal : un tel filtre n'est pas physiquement réalisable, car sa réponse impulsionnelle est non nulle pour $t < 0$. D'autre part, le théorème d'échantillonnage est un théorème-limite, car il n'existe pratiquement pas de signaux à spectre borné. Cependant, il permet de se faire une bonne idée de l'influence de l'échantillonnage.

Étudions maintenant la transposition de ce théorème dans le cas de l'échantillonnage de signaux aléatoires. On ne peut raisonner comme précédemment sur la transformée de Fourier de $x(t)$, puisque celle-ci est aléatoire. Le raisonnement est effectué sur la fonction d'autocorrélation et la densité spectrale de puissance. La fonction d'autocorrélation de $x(t)$ échantillonné est la fonction obtenue en échantillonnant la fonction d'autocorrélation de $x(t)$ si le processus $x(t)$ est stationnaire et ergodique. On peut donc transposer les résultats obtenus dans le cas déterministe : pour retrouver le spectre $S_x(f)$, il faut échantillonner à une fréquence égale ou supérieure à deux fois la fréquence maximale de la densité spectrale d'énergie $S_x(f)$. En général, on n'a aucune information sur la valeur de cette fréquence maximale, aussi fait-on passer les signaux à traiter dans un filtre passe-bas, qui limite en valeur le spectre, et procède-t-on ensuite à l'échantillonnage à une fréquence au moins double de celle du filtre passe-bas.

## *Les convertisseurs analogiques digitaux et digitaux analogiques*

Actuellement, on sait transformer directement en nombre les grandeurs continues du type tension ou courant électrique, les rotations et les déplacements. Avant de décrire plus complètement les convertisseurs, nous allons brièvement passer en revue quatre problèmes :

- Dans la conversion analogique numérique, on doit nécessairement utiliser un organe de blocage afin de

maintenir constante à l'entrée du convertisseur la grandeur à convertir. La conversion analogique numérique est souvent utilisée quand un calculateur est présent dans la chaîne de traitement; il est alors nécessaire de convertir le résultat digital des calculs effectués par l'ordinateur en grandeur analogique pouvant agir sur un organe physique. Cependant, la rapidité de calcul étant largement supérieure aux inerties des organes physiques, il est nécessaire de maintenir constantes les sorties du calculateur afin qu'elles restent disponibles entre les instants où deux résultats de calcul sont fournis : donc, en conversion numérique digitale, un bloqueur est aussi souvent nécessaire.

- Le temps de conversion doit être le plus faible possible, surtout pour les processus rapides.
- Les capteurs donnent souvent une information perturbée par du bruit (par exemple des parasites dus au secteur). Une première technique de lutte contre le bruit est de coder au niveau du capteur et de transmettre au calculateur avec un code peu sensible au bruit. Comme cette conversion au niveau du capteur n'est pas toujours possible, on peut soit amplifier avant transmission, ce qui est généralement coûteux, soit transmettre à faible niveau en réalisant un filtre passe-bas avant conversion (en particulier pour éliminer le 50 Hz).
- Le code de conversion est toujours un code binaire. Le plus simple est le code binaire naturel déjà décrit. Un nombre N s'écrit dans ce code avec un mot de $n$ chiffres de la façon suivante : $N = \sum_{i=0}^{n} a_i 2^i$ avec $a_i = 0$ ou 1. Ce code présente un inconvénient en conversion : plusieurs chiffres binaires peuvent se modifier en même temps lors du passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur. Ainsi 7 s'écrit 0111, et 8 s'écrit 1000 (4 chiffres binaires modifiés).

En revanche, le code binaire réfléchi ou code de Gray présente deux importantes propriétés qui rendent son emploi fréquent en codage. Tout d'abord, le passage d'un nombre au nombre immédiatement supérieur n'affecte qu'un digit. Ensuite, ce code est un code cyclique. La conversion d'un nombre écrit en code réfléchi en un nombre codé binaire naturel ou la conversion réciproque sont de plus très aisées. Ce code s'applique à des nombres compris dans un intervalle $(-c, +c)$ : sans nuire à la généralité, on prendra l'intervalle $(-1, +1)$ pour notre exposé. On veut coder par un mot de longueur 5 quatre indicateurs de la valeur numérique, un indicateur du caractère positif ou négatif du nombre. Généralement, ce « bit de signe » vaut $(+1)$ si le nombre est négatif, (0) si le nombre à coder est positif ou nul. Les autres chiffres des mots-codes sont déterminés à l'aide du graphique du *tableau* III. Ainsi, un nombre compris entre $\left(-\frac{1}{2} \text{ et } -\frac{5}{8}\right)$ s'écrit 1101. On voit aussi d'après cet exemple que, lorsqu'on passe d'un nombre au nombre immédiatement supérieur, il n'y a qu'un chiffre du mot binaire qui est modifié. Pour un mot codé avec $(n+1)$ bits, la définition est de $\frac{1}{2^{n+1}}$. Enfin, il est facile de vérifier que tous les mots obtenus se déduisent les uns des autres par une permutation circulaire (code cyclique).

Pour montrer le caractère simple de la transformation, donnons sur un exemple les règles de passage du code binaire au code de Gray. Soit un nombre en binaire par écrit $b_4b_3b_2b_1$ ($b_i = 0$ ou 1) et en code de Gray $a_4a_3a_2a_1$; les règles sont les suivantes :

$$a_4 = b_4 \qquad b_4 = a_4$$
$$a_3 = b_4 \oplus b_3 \qquad b_3 = a_4 \oplus a_3$$
$$a_2 = b_3 \oplus b_2 \qquad b_2 = a_4 \oplus a_3 \oplus a_2$$
$$a_1 = b_2 \oplus b_1 \qquad b_1 = a_4 \oplus a_3 \oplus a_2 \oplus a_1$$

$\oplus$ étant le symbole de l'opération logique « OU exclusif ». Par exemple, $1010 = 10_{10}$ en code binaire s'écrit en code de Gray :

$$\left.\begin{array}{l} a_4 = 1 \\ a_3 = 1 \oplus 0 = 1 \\ a_2 = 0 \oplus 1 = 1 \\ a_1 = 0 \oplus 1 = 1 \end{array}\right\} 1111$$

1011 en code de Gray correspond à :

**Tableau III**
**Codage de chiffres par code binaire réfléchi ou code de Gray (nombre compris entre —1, +1)**

$-1 \quad -\frac{7}{8} \quad -\frac{3}{4} \quad -\frac{5}{8} \quad -\frac{1}{2} \quad -\frac{3}{8} \quad -\frac{1}{4} \quad -\frac{1}{8} \quad 0 \quad \frac{1}{8} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{3}{8} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{5}{8} \quad \frac{3}{4} \quad \frac{7}{8} \quad 1$

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

▲ *Tableau III : codage de chiffres par code binaire réfléchi ou code de Gray (nombre compris entre — 1 et + 1).*

$$\left.\begin{array}{l} b_4 = 1 \\ b_3 = 1 \oplus 0 = 1 \\ b_2 = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0 \\ b_1 = 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 = 1 \end{array}\right\} 1101 = 13_{10}$$

### *Convertisseurs analogiques digitaux*

Nous allons maintenant décrire successivement les codeurs analogiques digitaux de tension ou de position.

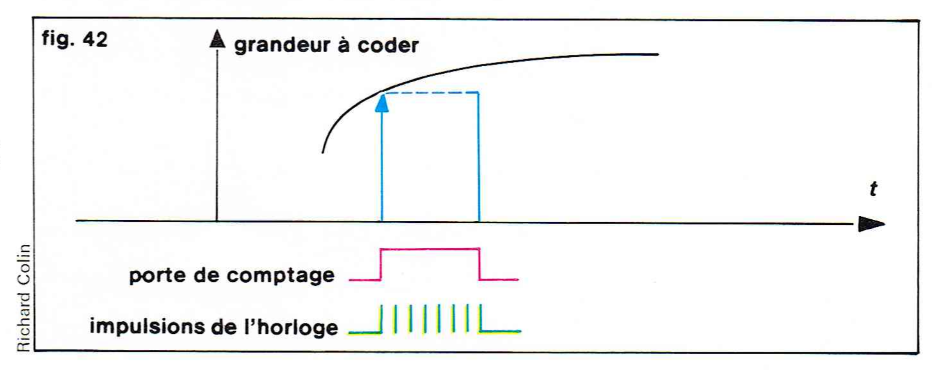
### Codeurs de tension

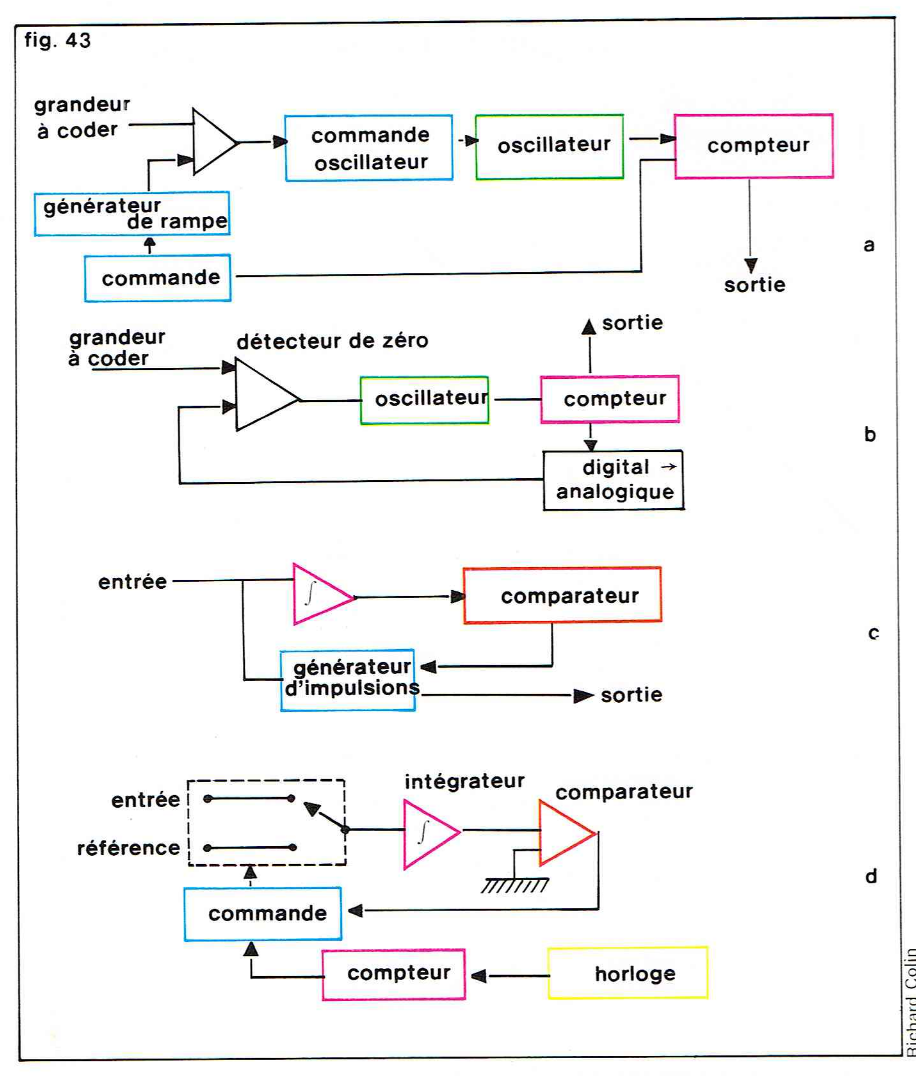
Il y a plusieurs méthodes de réalisation : les convertisseurs à rampe, les convertisseurs à approximations successives, les convertisseurs à tension-fréquence, les convertisseurs à double pente.

Dans le cas d'une conversion par utilisation d'une *rampe*, un compteur numérique est déclenché au début du codage en même temps qu'une tension de comparaison croît à partir de zéro, par exemple. Le comptage est arrêté lorsque la tension de comparaison est égale à la tension à coder (*fig.* 42). La précision du codeur dépend de l'élément de comparaison et de la précision de la tension de comparaison. Le temps de codage dépend de la valeur de la tension à coder. Un schéma synoptique de réalisation est donné *figure* 43a. Cette méthode de conversion est simple et peu coûteuse. Dans la réalisation Hewlett-Packard 3440, la conversion est affichée sur un indicateur numérique à 4 chiffres, la résolution est de 10 μV.

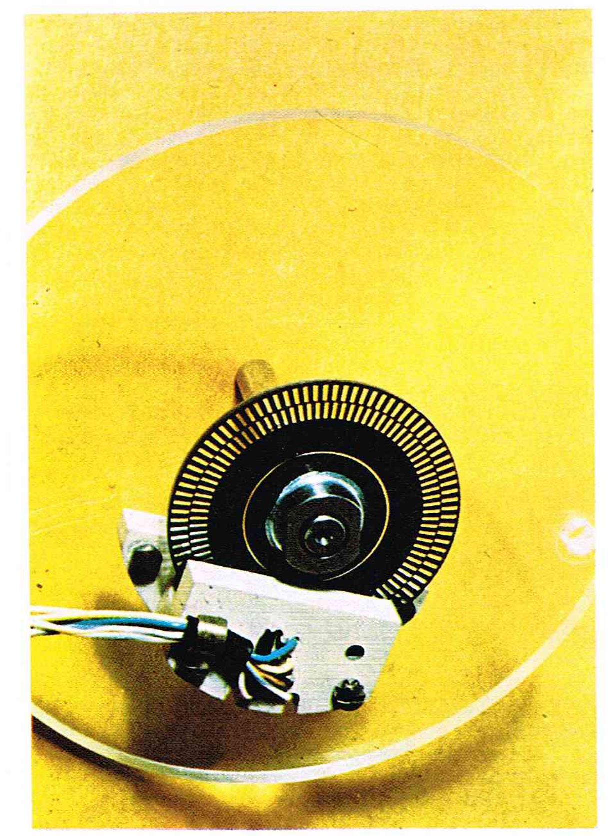
Un convertisseur à *approximations successives* utilise une boucle de réaction. Un compteur avance pas à pas, et un convertisseur digital analogique, dont nous décrirons le fonctionnement plus loin, convertit cette valeur digitale en une tension qui est comparée à la valeur de la tension d'entrée. Quand l'égalité est obtenue entre les deux tensions, le bouclage est rompu, et l'état du compteur indique la valeur digitale cherchée. Le schéma synoptique d'une réalisation simple est donné *figure* 43b : la méthode est lente, car on commence par les poids binaires les plus faibles. Les procédés suivants l'améliorent. Dans le cas de la comparaison par simple pesée, la tension de référence est élaborée en ajoutant les unes aux autres des tensions proportionnelles aux différentes puissances de 2. D'après le sens de la différence entre tension à coder et tension de référence, on élabore un signal de façon à modifier la référence pour qu'elle se rapproche le plus possible de la grandeur à coder. Si telle composante dans la tension de référence est présente, le chiffre binaire correspondant vaut 1; dans le cas contraire, si telle composante est sautée, le chiffre vaudra 0. On commence, pour élaborer la tension de

▼ *Figure 42 : principe du codage par utilisation d'une rampe.*






▲ *Figure 43 : schémas synoptiques de quatre types de codeurs de tension : a, convertisseur à rampes ; b, convertisseur à approximations successives ; c, convertisseur à tension-fréquence ; d, convertisseur à double pente.*



▶ *A gauche, un kit générateur d'impulsions incrémental comprenant 100 points et une remise à zéro. A droite, figure 44 : courbe permettant la comparaison d'une tension inconnue mesurée pendant un temps connu à une tension de référence mesurée pendant un temps variable (conversion double pente).*

référence, par la puissance de 2 la plus élevée ($2^{n-1}$ si le mot a *n* chiffres). Si la différence réalisée par le comparateur est positive, c'est-à-dire si la grandeur à coder est supérieure à la tension de référence, on ajoute à la grandeur de référence la tension correspondant à $2^{n-2}$. Si, par contre, cette différence est négative, on enlève la composante correspondant à $2^{n-1}$ et on ajoute celle correspondant à $2^{n-2}$, et ainsi de suite. Le nombre d'opérations ainsi effectuées est constant, indépendant de l'amplitude de la tension à coder (le nombre d'opérations est égal au nombre de chiffres binaires). Pour diminuer le temps de conversion, on peut rendre le système asynchrone : au lieu de commander le système par un registre synchronisé sur les impulsions d'une horloge, on enchaîne les essais les uns sur les autres, la fin d'un essai commandant le suivant. Le temps gagné est ainsi dans un rapport 2.

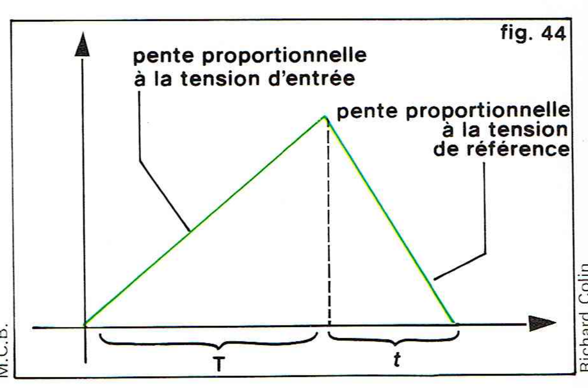
On peut augmenter la précision des convertisseurs précédents au détriment de leur rapidité : c'est la méthode de comparaison dite de *double pesée*. Tout d'abord, on mesure une tension $V_1$, ensuite on retranche de manière analogique la grandeur à mesurer V ; on mesure

$$V_2 = V_1 - V$$

la valeur V est obtenue en faisant la différence en binaire $V_2 - V_1$. Par rapport à la méthode de simple pesée, on compare toujours à la même grandeur $V_1$ ; quelle que soit la tension à coder V, le convertisseur travaille donc toujours dans les mêmes conditions. Ce système est plus lent que le précédent (temps plus que doublé), mais plus précis (toutefois son prix de revient est plus élevé). Les méthodes à approximations successives sont en général très rapides et stables. Leur précision et leur stabilité dépendent de la résolution du comparateur, de la précision du convertisseur digital analogique.

Les *convertisseurs à tension-fréquence* réalisent en premier lieu une intégration de la tension à convertir. Le résultat numérique est donc la valeur moyenne de la tension à convertir durant le temps d'opération. C'est un système bouclé (*fig.* 43c) : la fréquence d'un générateur d'impulsions est commandée de manière que la valeur moyenne des impulsions soit égale à la valeur moyenne de la grandeur à convertir. Si la grandeur d'entrée est par exemple positive, la sortie de l'intégrateur présente une évolution linéaire à pente négative. Quand le niveau du seuil du comparateur est atteint, celui-ci commande un générateur fournissant une impulsion déterminée en amplitude et en durée qui décharge le condensateur et replace l'intégrateur en position de départ. Cette méthode n'est ni aussi stable ni aussi précise que la méthode par approximations successives.

Le type de conversion le plus utilisé, dans les voltmètres numériques de précision par exemple, est la conversion dite *double pente*. Le schéma synoptique en est donné *figure* 43d. On compare dans cette méthode une tension inconnue mesurée pendant un temps connu avec une tension de référence mesurée pendant un temps variable. Durant un temps connu T, calibré par un compteur, on connecte l'entrée de l'intégrateur à la tension inconnue $V_e$. A la fin de ce temps, l'interrupteur bascule sur une entrée dite de référence $V_{ref}$ de polarité opposée. Dans un deuxième temps *t* variable, la charge décroît avec le temps, et on a une rampe linéaire. Ce processus s'arrête quand la tension atteint par exemple la valeur 0 (*fig.* 44). On a donc :



$$V_e T = V_{ref}\, t \text{ donc } V_e = V_{ref} \frac{t}{T}$$

T et $t$ sont déterminés par comptage d'impulsions d'horloge. Dans cette technique, la conversion finale est une conversion tension-temps; il y a intégration de l'entrée comme dans le cas de la conversion tension-fréquence; la précision et la stabilité sont bonnes sous réserve de celles du relais et de l'intégrateur.

**Codeurs de position**

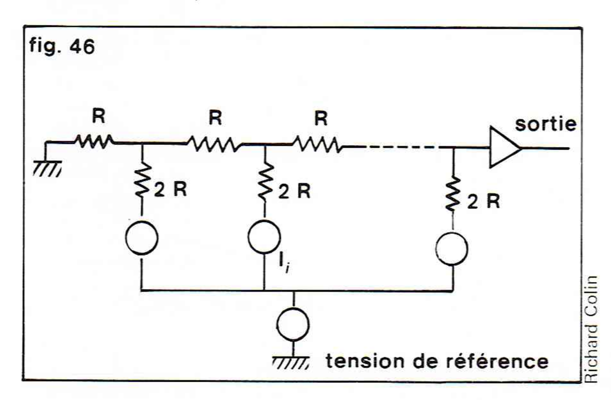
Si on utilise un transducteur continu, le mouvement est transformé soit en une grandeur électrique (par un potentiomètre, par exemple), soit en un intervalle de temps (déphasage). Ce déphasage ou cet intervalle est ensuite codé par une des méthodes précédemment décrites. Si on utilise un transducteur quantifié, on associe directement un nombre à la position à coder. Tels sont les dispositifs à code tournant (*fig.* 45). Soit un disque divisé en plusieurs couronnes, chacune correspondant à 1 bit. Chaque couronne porte alternativement des 1 ou des 0; la première couronne est séparée en deux, une zone correspondant à 1, l'autre à zéro. La seconde est divisée en 4 parties représentant alternativement 1 ou 0. Si les bits 1 sont, par exemple, matérialisés par une piste conductrice, il suffit de placer une série de frotteurs pour détecter ces zones et d'avoir directement la valeur binaire de l'angle de rotation. Pour remplacer les frotteurs, on peut utiliser des capteurs à photodiodes et un disque ayant des zones transparentes et des zones opaques, placé devant une source lumineuse. On aura intérêt ici, afin d'éliminer les erreurs dues au changement de chiffre, à utiliser un disque correspondant au code de Gray, car un seul bit change à chaque fois.

On peut aussi utiliser des dispositifs à comptage. Considérons un disque tournant dont le bord porte $n$ divisions. Il suffit, à partir d'une position de référence, de compter les divisions qui défilent; il y a toutefois une difficulté lors d'un changement de sens de rotation.

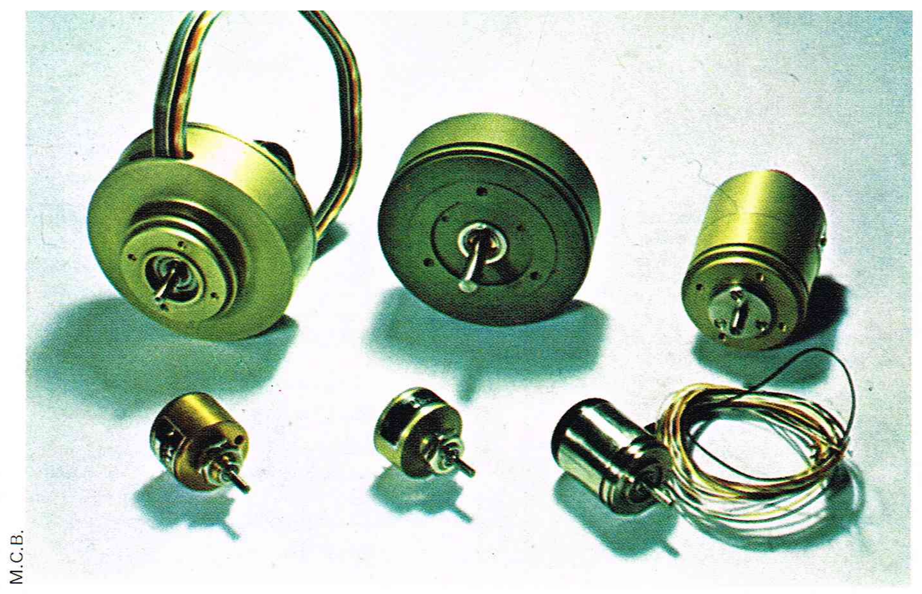
***Convertisseurs digitaux-analogiques***

Ces convertisseurs sont utilisés pour effectuer une visualisation tracée de résultats, pour commander un actionneur à partir d'un calculateur numérique, etc. Les *décodeurs de tension* les plus utilisés sont les décodeurs à réseau (*fig.* 46). Chaque interrupteur figuré par $I_i$ correspond à la valeur 1 ou 0 du chiffre correspondant du nombre binaire à décoder. Quand une branche est reliée à la tension de référence, toutes les autres étant reliées à la masse, le courant de la branche parcourt le réseau, et est divisé par 2 à chaque jonction. La contribution en courant de chaque branche est pondérée suivant le code binaire. Ce réseau R — 2 R présente l'avantage d'avoir une impédance constante vue de l'entrée du sommateur (R). La précision dépend des différences relatives des résistances, donc de leur évolution respective en fonction de la température.

Les *décodeurs de position* sont réalisés avec des codeurs de position entraînés par un automatisme et insérés dans un asservissement de position (*fig.* 47). Le codeur délivre un signal donnant la position de l'arbre de l'automatisme. Ce nombre est comparé à celui à décoder. La différence décodée commande l'asservissement. Des variantes de ce procédé permettent de supprimer le codeur de position.




Richard Colin



M.C.B.

fig. 47

automatisme

codeur de position

décodeur

soustracteur

nombre à décoder

Richard Colin

▲ *En haut, quelques codeurs optiques de position.*
***Ci-dessus, figure 47 : schéma synoptique de la réalisation d'un décodeur de position.***

***Mesures des fonctions d'autocorrélation et des spectres***

Pour calculer la *fonction de corrélation* entre deux fonctions aléatoires $x(t)$ et $y(t)$, il faut évaluer la quantité $E[x(t)\, y(t-\tau)]$ pour différentes valeurs de $\tau$. Si le processus est ergodique, on peut remplacer la moyenne probabiliste $E(\cdot)$ par une moyenne temporelle

$$\frac{1}{T}\int_0^T x(u)\, y(u-\tau)\, du$$

Dans le cas de signaux échantillonnés, ceci devient :

$$\frac{1}{N+1}\sum_{i=0}^{N} x(iT)\, y[(i-m)T]$$

où T est la période d'échantillonnage (on ne calcule la fonction de corrélation que pour des multiples de la période d'échantillonnage). Pour calculer une fonction de corrélation, il faut donc réaliser un opérateur retard, un multiplieur, un intégrateur ou un sommateur. Une méthode très lente et aujourd'hui un peu abandonnée consiste à réaliser un *corrélateur point par point.* On utilise un enregistreur magnétique muni d'un dispositif permettant de faire varier la position relative des deux têtes de lecture. Sur une piste on lit $x(t)$, sur l'autre $y(t)$. Ainsi, pour chaque position des têtes de lecture, $y(t)$ sera retardé d'un temps $\tau$ par rapport à $x(t)$. Les deux signaux sont ensuite multipliés, intégrés ou moyennés. Ce dispositif n'est plus guère utilisé aujourd'hui, les *corrélateurs électroniques* étant plus fiables et moins coûteux.

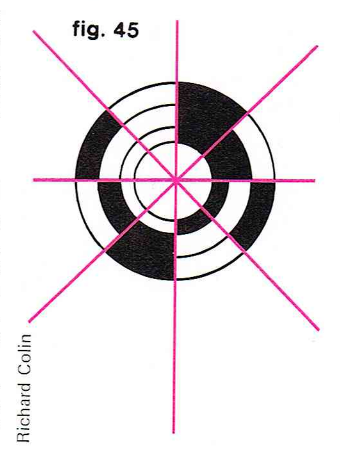
Pour aller plus vite, on cherche à avoir tous les points de la fonction de corrélation en même temps, de manière à éviter d'avoir à lire un grand nombre de fois les signaux. Ainsi travaillent les *corrélateurs en temps réel* sur signaux échantillonnés. Soit le $k$-ième échantillon du signal $y(t) : y(kT)$. On réalise les produits successifs

$$y(kT)\cdot x(kT),\ y(kT)\cdot x[(k+1)T],$$
$$y(kT)\cdot x[(k+2)T],\ \ldots,\ y(kT)\cdot x[(k+m)T]$$

ce qui correspond aux produits unitaires pour les retards respectifs 0, T, 2 T, ..., $m$T de la fonction de corrélation. Quand ceci est terminé, on recommence avec une valeur $y(lT)$ de $y(t)$. On somme alors les valeurs successives des produits correspondant à un retard nul, T, ..., $m$T. Chaque séquence comporte le prélèvement de $m$ échantillons espacés de T (*fig.* 48).

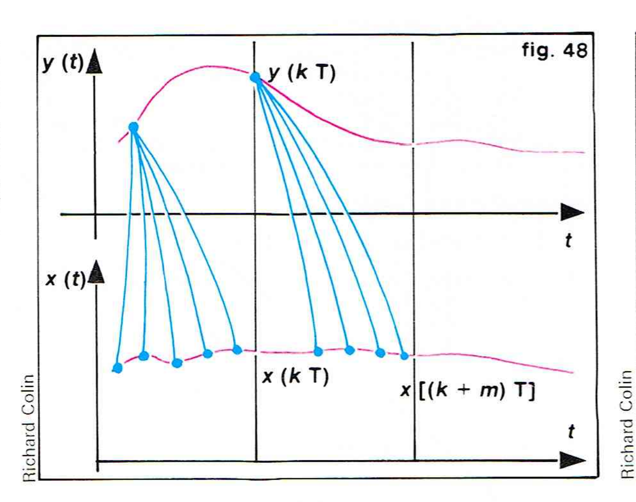
Pour calculer la fonction de corrélation sur N produits, il faut prendre $m$N échantillons, et donc observer le signal durant $m$NT unités de temps. Pour évaluer l'erreur

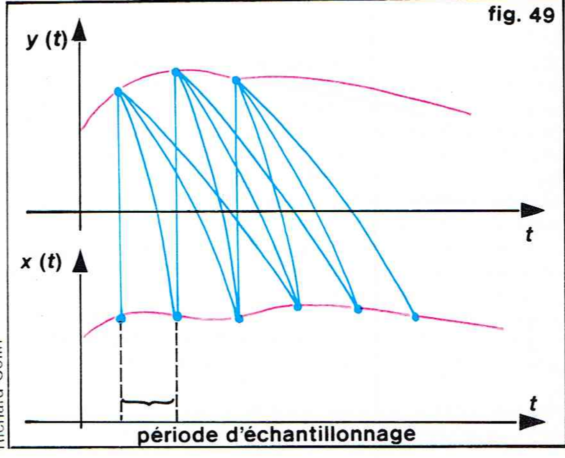
◀▼ *A gauche, figure 46 : schéma de principe d'un décodeur de tension à réseau.*
***Ci-dessous, figure 45 : représentation schématique d'un disque codé servant dans un codeur de position.***




Richard Colin

▶ *Figures 48 et 49 : principe de calcul de la fonction de corrélation entre deux fonctions aléatoires x (t) et y (t) ; fig. 48, méthode de calcul sur signaux échantillonnés ; fig. 49, calcul automatique en temps réel.*




possible, donnons-nous un intervalle de confiance de 90 %, c'est-à-dire qu'on a une probabilité de 0,90 que l'erreur d'estimation soit dans l'intervalle ($-\varepsilon$, $+\varepsilon$) ; on démontre alors, pour des signaux gaussiens, que

$$\varepsilon = 1{,}6\sqrt{\frac{m\mathrm{T}}{m\mathrm{NT}}\left(1 + \frac{\mathrm{R}^2xx\ (0)}{\mathrm{R}^2xx\ (\mathrm{T})}\right)}$$

L'erreur à l'origine vaut donc $\varepsilon_0 = 1{,}6\sqrt{2}\,\frac{1}{\sqrt{\mathrm{N}}}$. L'erreur est inversement proportionnelle à $\sqrt{\mathrm{N}}$.

On peut avoir une autre expression en faisant intervenir la largeur spectrale $f_c$ du processus étudié. En effet, $\mathrm{F} = \frac{1}{\mathrm{T}} = 2\,\alpha f_c$ (coefficient multiplicatif de la fréquence d'échantillonnage par rapport à la fréquence de Shannon). En ce cas, l'erreur à l'origine $\varepsilon_0$ s'écrit :

$$\varepsilon_0 = \frac{1{,}6}{\sqrt{f_c\mathrm{T_T}}}\cdot\sqrt{\frac{n}{\alpha}}$$

($\mathrm{T_T} = n\mathrm{NT}$, temps d'observation total).

L'erreur est $\sqrt{\frac{n}{\alpha}}$ fois plus grande dans le cas de l'échantillonnage. En fait, pour visualiser correctement la fonction de corrélation, on doit échantillonner à un rythme beaucoup plus rapide que la fréquence de Shannon et le terme $\frac{n}{\alpha}$ est bien diminué.

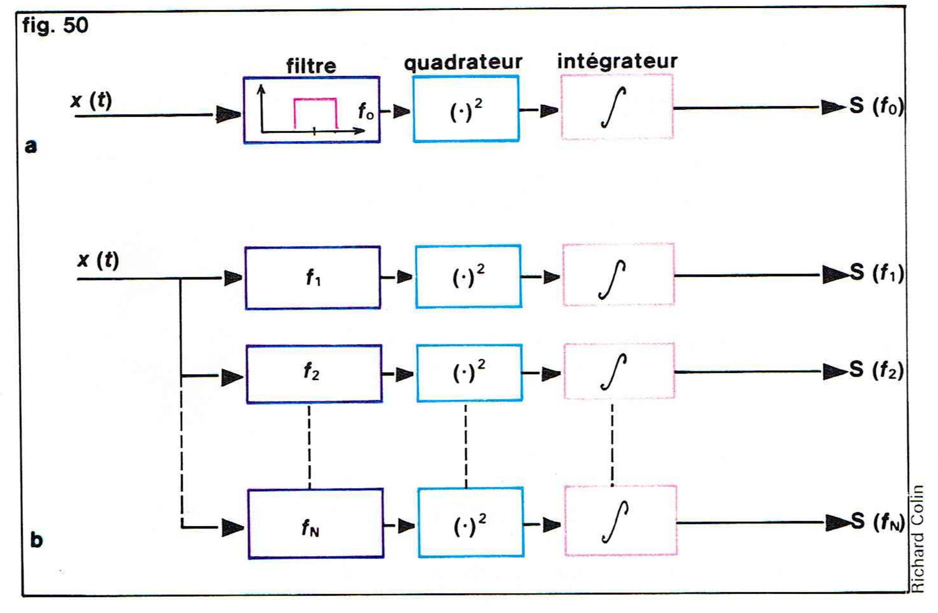
On réalise ainsi des *corrélateurs automatiques* travaillant en temps réel, utilisant simultanément toute l'information sur *x* (*t*) et *y* (*t*). Chaque voie est échantillonnée au même rythme (1/T) comme l'indique la *figure* 49. Le retard est réalisé soit à l'aide d'un registre à décalage, soit à l'aide de tables et pointeurs dans des mémoires RAM. La durée d'intégration est fonction, pour une bonne précision, de la bande spectrale du processus ; on distingue donc deux cas : les signaux de basse fréquence et les signaux de fréquence plus élevée. Dans le cas de signaux basse fréquence, l'intégration est nécessairement longue, et on procède par des méthodes numériques. Les signaux sont échantillonnés par deux convertisseurs analogiques numériques, mémorisés (les retards correspondent alors aux positions mémoires), multipliés, puis sommés dans des positions mémoires correspondant chacune à une valeur de la fonction de corrélation. Il est à noter qu'il est inutile d'échantillonner et de mémoriser toutes les valeurs nécessaires ; on mémorise seulement *m* valeurs de *x* (*t*) et une valeur de *y* (*t*) ; on réalise tous les produits entre deux périodes d'échantillonnage. Ces appareils sont actuellement réalisés en technologie MOS, donc en version intégrée. Le nombre de points de la fonction d'autocorrélation calculée peut être de 256, 512, 1 024, 2 048. Pour des signaux hautes fréquences, le temps d'intégration nécessaire est plus court (le temps d'intégration est, rappelons-le, donné pour un corrélateur idéal de $\mathrm{T_T} = \frac{2{,}6}{\varepsilon^2 f_c}$, $\varepsilon$ étant le niveau d'erreur choisi).

Si $f_c = 150$ Hz pour une précision de 2 %, un temps d'intégration de 20 s suffit. En ce cas, on réalise cette intégration par un simple filtre analogique passe-bas. Du fait qu'il peut aussi réaliser le produit sous forme analogique, le codage analogique numérique est imposé par la réalisation des retards. Il est inutile de coder les deux voies ; seule la voie devant être retardée sera convertie en numérique. De plus, à cause de la présence de fréquences élevées dans le signal, on peut faire fonctionner l'ensemble sous forme parallèle. Ce type de corrélateur est en fait constitué de *m* corrélateurs associés en parallèle, chacun associé à un retard de la voie *y* convertie en numérique. Rien, en principe, ne limite le nombre de points, si ce n'est le prix des composants, en baisse actuellement ; la technologie LSI permet de faire des corrélateurs ayant un très grand nombre de points sans se heurter à des difficultés de prix et de volume, insurmontables avec les anciennes technologies.

Pour calculer la *densité spectrale de puissance,* deux approches sont possibles : par transformée de Fourier ou par filtrage direct du signal. Dans ce dernier cas, on filtre le signal dans un filtre (*fig.* 50a) dont la fonction de transfert se rapproche le plus possible du filtre idéal de valeur 1 entre $f_0 - \Delta f$ et $f_0 + \Delta f$, et de valeur 0 ailleurs. La sortie du filtre est élevée au carré dans un quadrateur, le résultat étant moyenné dans un intégrateur. Ces opérations sont à répéter pour autant de valeurs de définition en fréquence que l'on désire pour le spectre $\mathrm{S}_x$ (*f*) ; les répéter N fois exclut donc un travail en temps réel. Il faut constituer une batterie de filtres en parallèle, chacun travaillant pour une fréquence bien déterminée (*fig.* 50b). Ce système présente d'énormes difficultés de réalisation (largeurs de bande égales ; positionnement des fréquences, non-recouvrement des filtres).

Une autre méthode consiste à numériser les signaux pendant une durée $\tau$ (c'est-à-dire à prendre *n* échantil-

▼ *Figure 50 : montage permettant le calcul de la densité spectrale de puissance par filtrage direct du signal ; a, calcul d'un point pour une valeur de la fréquence ; b, montage permettant d'obtenir simultanément N valeurs de définition en fréquence pour le spectre $\mathrm{S}_x$ (f).*



lons). On relit cette mémoire à grande vitesse, on décode en analogique, on filtre, puis on intègre la sortie du filtre élevée au carré. Après N relectures et en changeant la fréquence de définition du filtre, on obtient le spectre $S_x(f)$. Comme on travaille sur une tranche de durée $\tau$, il faudra, pour avoir une bonne précision, recommencer $m$ fois (donc $m\tau = N$). Si les N relectures de la mémoire peuvent avoir lieu durant une période d'échantillonnage T, le système peut travailler en temps réel. C'est l'analyseur à compression de temps.

L'utilisation directe de la transformée de Fourier permet de travailler entièrement en numérique. De plus, Cooley et Tuckey ont mis au point un algorithme rapide de calcul de transformée de Fourier (FFT, « Fast Fourier Transform »). Actuellement sont commercialisés des calculateurs en technologie intégrée dont la fonction unique est le calcul de la transformée de Fourier. Considérons $x(t)$ pendant une durée $\theta$. On aura $x(t) = x(\theta)$ dans l'intervalle $t - \theta/2, t + \theta/2$. $x_\theta(t)$ a une transformée de Fourier $X_\theta(f)$. Par le théorème de Parseval

$$\frac{1}{\theta}\int |x_\theta(t)|^2 dt = \frac{1}{\theta}\int_{-\infty}^{+\infty} |X_\theta(f)|^2 df = \int S_{X\theta}(f, \theta)\, df$$

Donc :

$$S_{X\theta}(f) = \frac{|X_\theta(f)|^2}{\theta}$$

Pour calculer avec la même résolution la densité spectrale sur $T = n\theta$, on calcule $S_{X\theta}(f)$ sur chaque tranche et on fait la moyenne

$$S_X(f, \theta) = \frac{1}{n}\sum_\theta S_{X\theta}(f) = \frac{1}{n}\sum_\theta \frac{|X_\theta(f)|^2}{\theta}$$

Échantillonnons le signal à la fréquence $F_e = \frac{1}{T_e}$ ; et soit N le nombre de points mémorisés. La durée du signal est $\theta = NT_e$. On montre facilement que le spectre calculé par la méthode ci-dessus $S_{XX}(f, \theta)$ est égal au spectre réel convolué par

$$\theta^2 \left(\frac{\sin \pi f\theta}{\pi f\theta}\right)^2$$

La finesse d'analyse est donc inversement proportionnelle à $\theta$ (largeur de $\left(\frac{\sin \pi f\theta}{\pi f\theta}\right)^2 \theta^2$ à mi-hauteur). Et elle est donc liée à $\theta = NT_e$. N étant fixé par construction, on a intérêt à échantillonner $x(t)$ à une fréquence aussi proche que possible de la fréquence de Shannon. Soit $f_c$ la limite supérieure du spectre

$$F_e = 2\alpha f_c \quad (\alpha \geqslant 1)$$

On obtient N points du spectre, celui-ci est donc échantillonné en fréquence avec un intervalle $\Delta f = \frac{f_c}{N}$. Au mieux, le spectre est échantillonné dans les mêmes conditions que le signal, c'est-à-dire dans le même rapport au regard de la fréquence de Shannon.

On peut opérer enfin par calcul préalable de la fonction de corrélation, puis prendre la transformée de Fourier. Avec un corrélateur à N points donnant la fonction de corrélation pour des retards variant entre $-[(N-1)]\,T_e$ et $[(N-1)]\,T_e$, on démontre que la finesse d'analyse ne peut être meilleure que

$$\frac{1}{2(N-1)\,T_e}$$

On a donc intérêt à avoir $2(N-1)\,T_e$ aussi grand que possible, et donc, N étant fixé par construction, à prendre $T_e$ aussi grand que possible, et $F_e$ faible (tout en restant compatible avec le théorème de Shannon). La plus basse fréquence analysée du spectre est $\frac{1}{2(N-1)\,T_e}$ et les fréquences seront espacées de $\frac{1}{2(N-1)\,T_e}$. La fréquence maximale sera $\frac{1}{2\,T_e}$. Avec un corrélateur à N points, on peut calculer par transformée de Fourier N points significatifs du spectre, mais rien n'empêche d'en calculer un nombre plus grand par interpolation.

Les appareils calculant corrélation et spectre, appelés *analyseurs de spectre,* sont maintenant réalisés en technologie intégrée : ils comprennent des organes de mémoire pour les entrées et la conservation des valeurs des fonctions sinus et cosinus, un multiplicateur, un intégrateur. Généralement, outre la partie réelle et la partie imaginaire du spectre (dans le cas d'un cross-spectre), ces appareils fournissent module et phase.

## *Quelques applications des méthodes de corrélation*

● Nous allons tout d'abord montrer comment on peut *détecter un signal périodique noyé dans du bruit.* Soit $x(t)$ le signal périodique de période T, $n(t)$ le bruit de moyenne supposée nulle, $y(t)$ l'observation :

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

Nous supposons aussi le signal $x(t)$ non correlé avec le bruit $n(t)$, ce qui est une hypothèse physique très plausible. Calculons l'autocorrélation de l'observation $y(t)$ :

$$\begin{aligned} R_{yy}(\tau) &= E[(y(t)\,y(t-\tau)] \\ &= E[(x(t) + n(t)\,(x(t-\tau) + n(t-\tau)] \\ &= R_{xx}(\tau) + R_{nn}(\tau) \end{aligned}$$

(Puisque $R_{xn}(\tau) = R_{nx}(\tau) = 0$.)

Si le bruit est blanc (*cf.* définition donnée antérieurement), $R_{yy}(\tau)$ s'écrit $R_{xx}(\tau)$.

Si le bruit n'est pas blanc, il présente au moins un spectre limité en fréquence, donc, pour $|\tau| > T_1$, $R_{nn}(\tau) = 0$, et on retrouve l'équation ci-dessus. Or $R_{xx}(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation d'un signal périodique, elle est donc périodique, et cette méthode permet de déceler s'il existe ou non un signal périodique noyé dans du bruit.

Pour simplifier, supposons le signal périodique de la forme $X_0 \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right)$. Le rapport de la puissance du signal à la variance $\sigma^2$ du bruit s'appelle le rapport signal sur bruit. Il vaut ici $\eta = \frac{X_0^2}{\sigma^2}$ ; c'est une indication des « forces » relatives. Si le calcul de la corrélation est effectué sur $n$ réalisations, on montre que ce rapport signal sur bruit en sortie du corrélateur devient :

$$\eta_1 = \frac{n}{\frac{4}{\eta} + \frac{2}{\eta^2}}$$

A noter que le rapport signal sur bruit se donne généralement en décibels $\left(\eta_{dB} = 10 \log_{10} \frac{X_0^2}{\sigma^2}\right)$. Ainsi, si $n$ vaut 1 000, le rapport signal sur bruit peut passer de — 35 dB à — 30 dB ; si $n$ vaut 100 000, de — 35 dB à — 22 dB.

● Une deuxième application est constituée de l'*extraction d'un signal répétitif noyé dans du bruit.* On suppose connus les instants d'apparition du signal, on observe

$$y(t) = x(t) + n(t)$$

où $n(t)$ est un processus de moyenne nulle spectre borné. A chaque début d'apparition du signal $x(t)$, on commence un échantillonnage et on mémorise ces échantillons. Soit N le nombre d'échantillons pris sur une période $y_1(0), y_1(T_c) \ldots y_1(N-1)(T_c)$. On répète ce processus sur $m$ intervalles de temps (ces intervalles sont supérieurs aux périodes d'apparition du signal [*fig.* 51]). On additionne ensuite les échantillons de même rang, c'est-à-dire qu'on constitue :

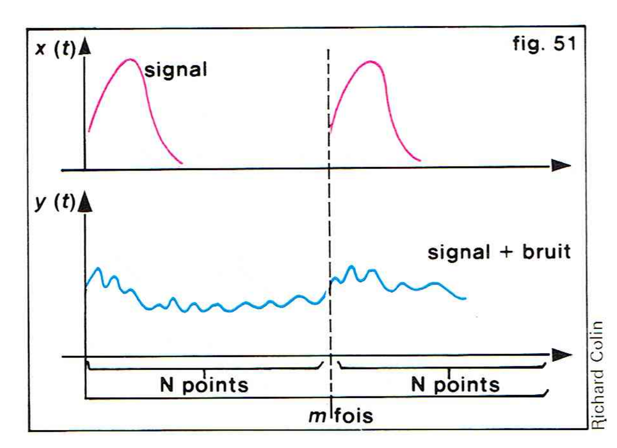
$$\sum_{i=1}^{m} y_i(0) \quad \sum_{i=1}^{m} y_i(T_c) \ldots \sum_{i=1}^{m} y_i((N-1)\,T_c)$$

Si le spectre du bruit est borné à fréquence maximale du spectre, $f_c$ faible ($1/f_c$ période du signal), les échantillons successifs de bruit sont indépendants et

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{m} y_i(jT_c) &= \sum_{i=1}^{m} [x_i(jT_c) + n_i(jT_c)] \\ &\simeq \sum_{j=1}^{m} x_i(jT_c) \simeq m x_i(t) \end{aligned}$$

$x_i(\;)$ représente le $i$-ième échantillon du signal $x(t)$. On retrouve donc bien le signal $x(t)$. L'opération ainsi

▶ ***Figure 51 : principe de l'extraction d'un signal répétitif noyé dans du bruit (voir développement dans le texte).***




effectuée s'appelle un moyennage. Si $\eta_0$ est le rapport signal sur bruit avant le moyennage, $\eta_1$ après, on a la relation

$$\eta_1 = \sqrt{m}\,\eta_0$$

On améliore donc le rapport signal sur bruit dans le rapport $\sqrt{m}$. Pour voir quelles sont les limites de cette méthode, il faut être conscient des nombreuses hypothèses prises en début de l'exposé. Il existe d'autres méthodes d'extraction d'un signal du bruit, valables avec des hypothèses moins contraignantes, mais aussi plus coûteuses.

● Une autre application très utilisée est la *mesure de la réponse impulsionnelle d'un système linéaire*. En effet, au cours d'exposés précédents, nous avons déjà parlé de cette fonction très importante, mais nous n'avons jamais défini comment on l'obtenait. On peut la déduire des équations physiques des constituants du système, ou bien par analyse des signaux d'entrée et de sortie $x(t)$ et $y(t)$. Parmi les méthodes utilisant cette analyse, celle que nous allons décrire suppose qu'on place à l'entrée du système un processus aléatoire. Rappelons que si $h(u)$ est la réponse impulsionnelle du système :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} x(u)\, h(t-u)\, du$$

Si on calcule la corrélation sortie-entrée, on a le résultat suivant :

$$R_{xy}(T) = \int_{-\infty}^{T} R_{xx}(u)\, h(T-u)\, du$$

Supposons que le processus aléatoire $x(t)$ en entrée soit un bruit blanc, alors $R_{xx}(u) = \delta(u)$ et $R_{xy}(T) = h(T)$. On mesure donc directement la réponse impulsionnelle du système par corrélation sortie-entrée (*fig.* 52). Cette méthode présente le très grand avantage d'être encore applicable si le signal test $x(t)$ est superposé à l'entrée $e(t)$ du système en fonctionnement normal. Car

$$R_{(x+e)\,y}(T) = \int R_{xx}(u)\, h(T-u)\, du$$

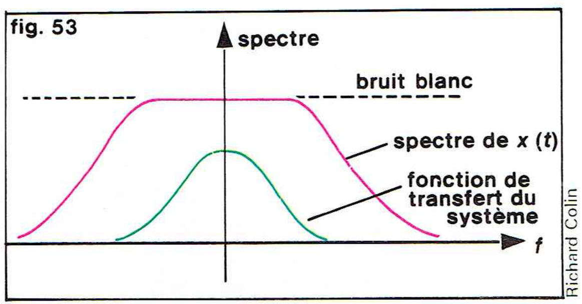
puisque $R_{ye} = 0$, car $y$ et $e$ sont indépendants. On retrouve $R_{(x+e)\,y}(T) = h(T)$ si $R_{xx}(T) = \delta(T)$. De plus, ce signal $x(t)$ peut être choisi assez faible en puissance pour ne pas perturber le fonctionnement du système. Cependant, il faut réaliser un processus $x(t)$ « blanc » qu'on sait non physique. Il suffit d'abord que la densité spectrale de $x(t)$ soit plus grande que la bande passante du système (*fig.* 53). Ainsi, pour le système, le bruit apparaît comme « blanc ». Cela revient à dire que $R_{xx}(u)$ doit être étroite devant $h(T)$. On réalise en général $x(t)$ à l'aide d'un bruit binaire pseudo-aléatoire (*fig.* 54a) dont la fonction de corrélation est donnée *figure* 54b. Cette fonction d'autocorrélation ne correspond pas à celle d'un bruit blanc, puisque, en particulier, elle est périodique. Le signal se présente sous la forme d'une succession d'impulsions de largeur variable, cette largeur étant un multiple entier d'une largeur minimale $\theta$. Si la longueur d'une séquence est $N\theta$, la fonction d'autocorrélation est un triangle de base $2\theta$. Si on répète indéfiniment la séquence de base, la fonction d'autocorrélation est périodique de période $N\theta$.

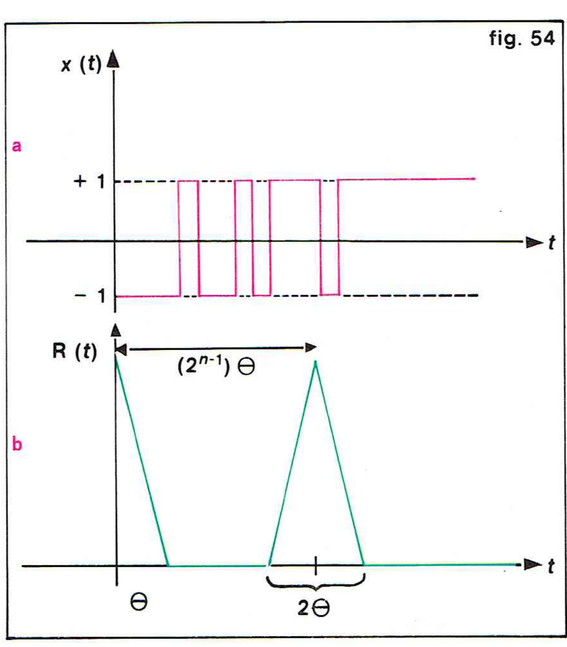
La génération d'un tel signal se fait au moyen d'un registre à décalage bouclé sur lui-même par des OU exclusifs selon des techniques analogues aux générations des codes cycliques. Si le registre a $n$ étages et fonctionne avec une fréquence d'horloge F, la base des triangles de l'autocorrélation est $\frac{2}{F}$, et la période $(2^n - 1)\,\theta$. Par action sur l'horloge et sur le nombre d'éléments du registre, on peut se rapprocher de l'autocorrélation d'un bruit blanc. Comment choisir $n$ ? Si la réponse impulsionnelle est présumée s'annuler pour $t > t_M$ il faut que $(2^n - 1) \gg t_M$ soit $(2^n - 1) > t_M F$, soit environ $t_M > \frac{\log t_M F}{\log 2}$. D'autre part, il ne faut pas hésiter à prendre $\theta$ assez petit, ce qui est évident d'après la forme de la fonction d'autocorrélation.

## *Lien avec la théorie de l'information. Rapport signal sur bruit*

Pour conclure cette partie consacrée à l'analyse du signal, nous allons reprendre la notion d'information transmise par un canal dans le cas continu. Rappelons que cette information I (X ; Y) transmise entre l'entrée X et la sortie Y du canal s'écrit

$$I(X;Y) = \iint f(x,y)\, \mathrm{Log}\, \frac{f(x,y)}{f_X(x)\, f_Y(y)}\, dxdy$$




▶ ***Figures 52, 53 et 54 : principe de la mesure de la réponse impulsionnelle d'un système linéaire par corrélation sortie-entrée (voir développement dans le texte).***

où $f(x, y)$ est la densité conjointe de $x$ et de $y$, $f_X(x)$ $f_Y(y)$ respectivement les densités marginales de $x$ et de $y$. Un canal transmettant des signaux continus est dit aussi continu. En général, le canal a une bande passante limitée, ce qui peut entraîner une perte d'information si le signal présente un spectre trop large. Une modification de l'information transmise peut aussi être causée par le bruit présent dans le canal.

Soit $(-f_c, +f_c)$ la bande passante du canal. Les signaux transmis sont alors justifiables du théorème d'échantillonnage. Les signaux sont entièrement déterminés par des valeurs espacées de $\frac{1}{2f_c}$ secondes. Il suffit donc de les spécifier $2f_c$ fois au cours d'une seconde. La capacité du canal est définie, rappelons-le, comme le maximum d'information transmissible par unité de temps. Nous supposerons pour son calcul que le bruit est une fonction aléatoire stationnaire de second ordre. La capacité C est donc à un instant le maximum, pris par rapport à toutes les lois d'émission possibles, de I (X; Y). La vitesse maximale de transmission de l'information est donc $2f_c$ C bits par seconde. Pour faire le calcul, nous allons ajouter les hypothèses suivantes :

- $y(t) = x(t) + n(t)$, c'est-à-dire le bruit est additif.
- Le bruit $n(t)$ est indépendant du signal.
- $n(t)$ est de moyenne nulle

$$I(X; Y) = H(Y) - H(Y/X)$$
$$H(Y/X) = H(X/X) + H(N/X) = H(N)$$

En effet, la connaissance de X enlève toute incertitude sur X, d'autre part le bruit et le message sont indépendants. Ajoutons l'hypothèse que le bruit est un processus gaussien de variance $\sigma^2$

$$H(N) = \log \sqrt{2\pi e \sigma^2}$$

d'après ce que nous avons vu précédemment. Donc

$$C = \max (H(Y) - \log \sqrt{2\pi e\sigma^2})$$

Si le message $x(t)$ est aussi un processus gaussien centré de variance $s^2$, $y(t)$ se comporte comme un processus gaussien de variance $(s^2 + \sigma^2)$ et H (Y) vaut :

$$H(Y) = \log \sqrt{2\pi e(\sigma^2 + s^2)}$$

Donc $\quad C = \max [\log \sqrt{2\pi e(\sigma^2 + s^2)} - \log \sqrt{2\pi e \sigma^2}]$

Or l'entropie d'une fonction aléatoire est maximale lorsque ce processus est gaussien, cas dans lequel nous sommes. Donc la capacité d'un tel canal s'écrit

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)$$

et la vitesse de transmission de l'information maximale vaut

$$V = f_c \log \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right) \text{ bits/s}$$

Nous obtenons la célèbre formule de Hartley-Tuller-Shannon. Cette formule indique le lien précis qu'il y a entre bande passante $(-f_c, +f_c)$ et rapport signal sur bruit $\frac{s^2}{\sigma^2}$.

En suivant le modèle géométrique de Shannon, nous allons voir qu'on peut atteindre cette vitesse maximale sans perte d'information. Nous rappellerons au premier abord quelques résultats sur les espaces multidimensionnels. Si $x_1, ..., x_n$ sont les coordonnées d'un point M dans un tel espace, la distance de M à l'origine O vaut

$$OM = \sum_{i=1}^{n} x_i^2$$

et le volume V d'une hypersphère de rayon $a$

$$V = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma(n/2 + 1)} a^n$$

($\Gamma(x) = \int_0^x t^{x-1}e^{-t}\,dt$ est une fonction spéciale appelée fonction gamma).

Si les signaux acheminés par le système ont une durée de T secondes, le canal présentant une largeur de bande $(-f_c, +f_c)$, on peut, d'après le théorème d'échantillonnage, représenter le signal par $2f_c$T échantillons. Dans un espace à $2f_c$T dimensions, le signal est représenté par un point, chaque coordonnée égalant la valeur d'un échantillon $x_i$. La puissance moyenne de $x(t)$ peut se calculer par

$$S^2 = \frac{1}{2f_cT} \sum_{i=1}^{2f_cT} x_i^2$$

donc la distance du point X, signal à l'origine, s'écrit :

$$OX^2 = \sum_{i=1}^{2f_cT} x_i^2 = 2f_cTS^2$$

La distance du point représentatif du signal est égale au produit du nombre de dimensions par la puissance moyenne. Donc, si les signaux sont des morceaux de T secondes d'un signal continu, les points représentatifs sont à la surface d'une hypersphère dans un espace à $2Tf_c$ dimensions (la puissance des signaux étant considérée la même). Ajoutons maintenant un bruit gaussien centré de variance (donc de puissance) $\sigma^2$. La puissance moyenne du signal reçu est $(\sigma^2 + s^2)$. Le point représentatif est à l'intérieur d'une sphère de rayon

$$\sqrt{2Tf_c(\sigma^2 + s^2)}$$

La figure 55 montre une coupe d'un tel système. Soit B le point représentatif du signal reçu, A celui du signal émis. A se trouve à l'intersection d'une sphère de rayon $\sqrt{2Tf_c\sigma^2}$ de centre B et d'une sphère de rayon $\sqrt{2Tf_cs^2}$ de centre O. La probabilité de se trouver dans l'intersection peut être estimée, dans le cas d'une distribution uniforme, par

$$P = \frac{\text{volume de l'intersection}}{\text{volume de la sphère}}$$

Après calcul, cette probabilité peut être majorée par :

$$P < \left(\frac{\sigma^2}{s^2 + \sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Pour que la discrimination au niveau du récepteur soit parfaite, il faut que, parmi tous les signaux transmis, seul le point A soit à l'intérieur de l'intersection. Soit M le nombre de signaux transmis. La probabilité P' pour que (M — 1) signaux soient à l'extérieur vaut :

$$P' = (1 - P)^{M-1}$$

Donc : $\quad P' > \left(1 - \left(\frac{\sigma^2}{s^2 + \sigma^2}\right)^{Tf_c}\right)^{M-1}$

Si on veut que P' soit supérieur à $1 - \varepsilon$ ($\varepsilon$ petit : donc que le système marche presque parfaitement), cela revient à :

$$(M - 1) < \varepsilon \left(\frac{s^2 + \sigma^2}{\sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Cette condition est satisfaite si :

$$M < \left(\frac{s^2 + \sigma^2}{\sigma^2}\right)^{Tf_c}$$

Le second membre de cette inégalité donne la limite maximale du nombre de signaux transmissibles, donc la cadence maximale de transmission de l'information. Cette cadence maximale est donnée par :

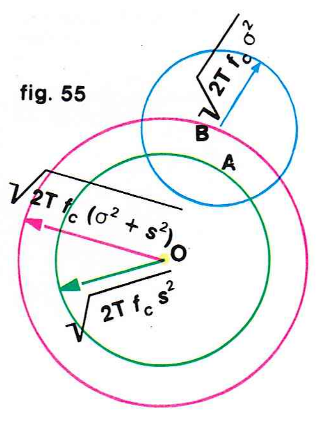
$$C = \frac{\log_2 M}{T} = \frac{\log_2 \varepsilon}{T} + f_c \log_2 \left(1 + \frac{s^2}{\sigma^2}\right)$$

Si $\varepsilon$ est un taux d'erreur arbitrairement petit, $\log_2 \varepsilon$ tend vers $-\infty$. En prenant T grand, on fait tendre $\frac{\log_2 \varepsilon}{T}$ vers zéro, et le système peut transmettre l'information avec un taux d'erreur faible, arbitraire, à une cadence donnée par la formule de Shannon. Ce développement permet de faire le lien entre l'analyse du signal et la théorie de l'information, montrant bien que les deux analyses sont conjointes.

## BIBLIOGRAPHIE

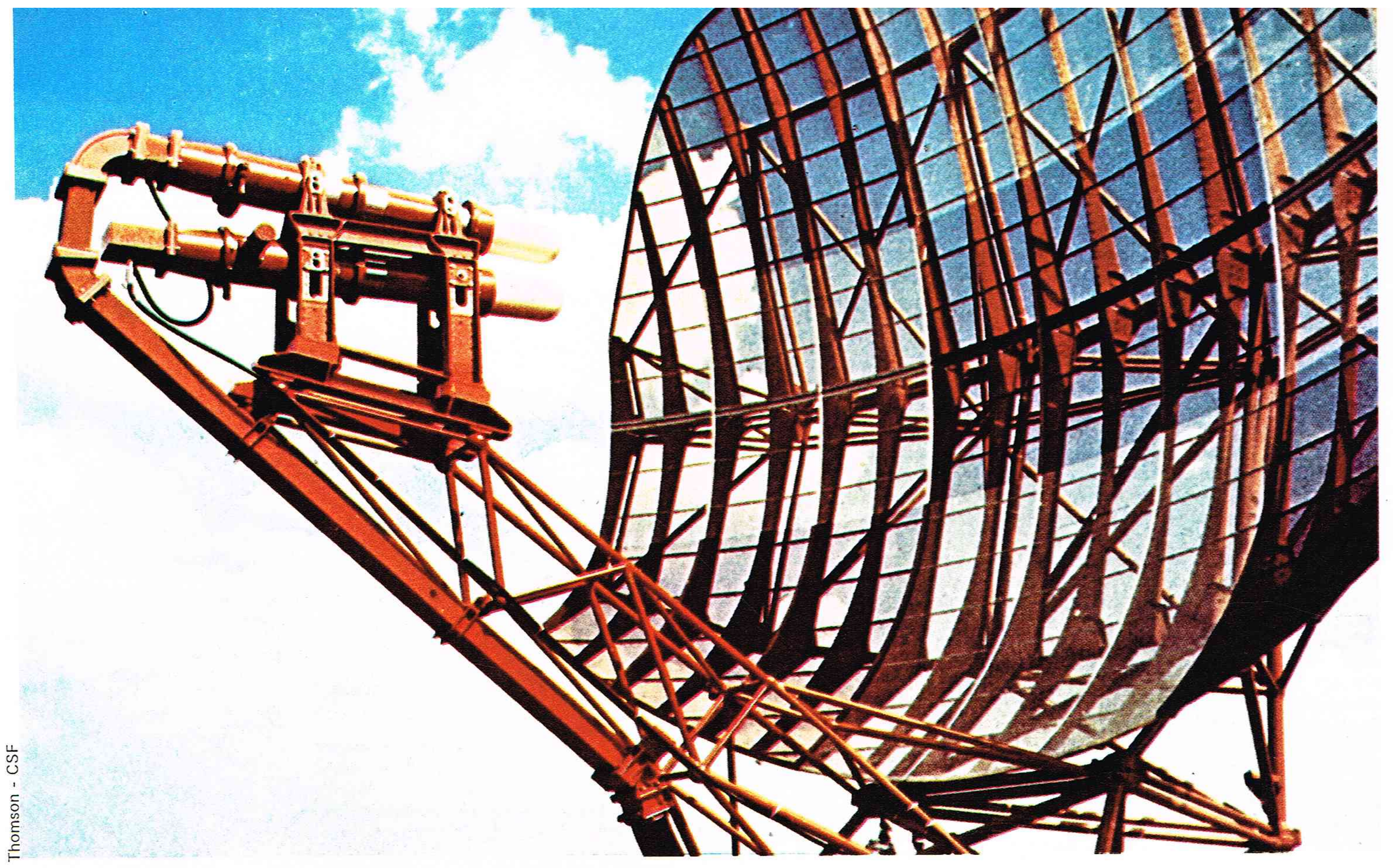

COOPER G. R., Mc GILLEN Clar D., *Probabilistic Methods of Signal and System Analysis*, Holt, Rinehart and Winston, 1971. - MAX J., *Méthodes et Techniques de traitement du signal et Applications aux mesures physiques*, Paris, Masson, 1972. - STERN J., DE BARBEYRAC J., POGGI R., *Méthodes pratiques d'études des fonctions aléatoires*, Paris, Dunod, 1967.


fig. 55




Richard Colin

▲ ***Figure 55 : rapport signal sur bruit dans le cas d'information transmise par un canal dans le cas continu (voir développement dans le texte).***



Thomson - CSF

▲ *L'antenne d'un radar bande L à haute puissance (2 MW) assurant la surveillance de la zone terminale des grands aéroports (hauteur 5 m, envergure 7 m, vitesse 15 t/mn).*

▼ *Tableau I : choix des bandes de fréquence et longueurs d'onde correspondantes pour un radar en fonction de l'usage prévu.*

# LA DÉTECTION

## *Le radar*

Le radar (Radio Detection and Ranging) est un système de détection électromagnétique des obstacles fixes ou mobiles : c'est la réflexion des ondes électromagnétiques sur les objets qui permet de déceler leur existence, de déterminer leur position et d'identifier leur nature et même leur forme. Si l'objet est équipé d'un dispositif qui détecte l'onde émise et renvoie cette énergie après amplification, le système émetteur qui l'a éclairé peut échanger une véritable conversation avec cette cible dotée d'un *répondeur actif :* il s'agit du *radar secondaire* utilisé dans l'aviation et les vols interplanétaires.

**Tableau I**

**Choix des bandes de fréquence et longueurs d'onde correspondantes d'un radar en fonction de l'usage prévu**

| Bandes | Fréquences (en MHz) | Longueurs d'ondes (en cm) | Usages |
|---|---|---|---|
| | 3-30 | 10 000-1 000 | (1) |
| L | 1 120-1 700 | 26-17 | (2) |
| S | 2 600-4 000 | 11,5-7,6 | (2) (3) |
| C | 3 950-5 850 | 7,6-5,12 | (3) |
| X | 8 200-12 400 | 3,6-2,42 | (3) (4) |
| K | 18 000-26 500 | 1,67-1,13 | (4) |
| Q | 33 000-50 000 | 0,91-0,60 | (4) |
| Optique | $\simeq 5 \cdot 10^8$ | $6 \cdot 10^{-5}$ | (5) |

(1) Très grande portée.
(2) Stations fixes, veille aérienne.
(3) Stations mobiles, tir, navigation.
(4) Aéroporté, navigation, météorologie.
(5) Météorologie.

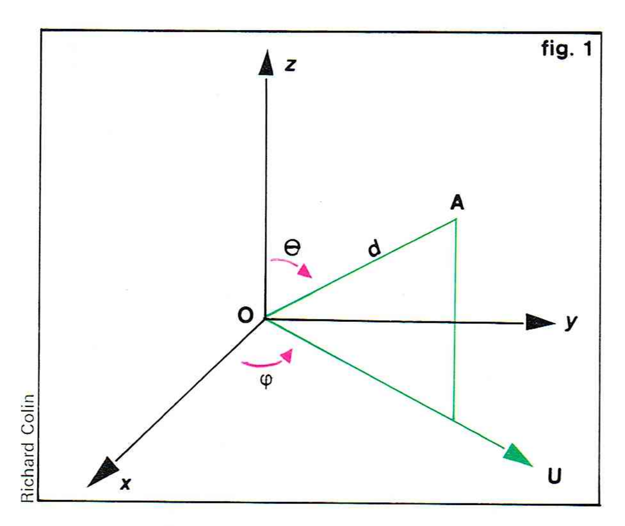
Depuis la naissance du radar, entre 1930 et 1935, simultanément en France, aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Allemagne, les ingénieurs ont travaillé à en développer les principes théoriques; les progrès technologiques tout récents permettent de mettre en pratique les idées nouvelles (1), aboutissant ainsi à des réalisations très sophistiquées, et bien éloignées en particulier du dispositif anticollision qui, dès 1935, avait équipé le paquebot *Normandie.*

**(Les chiffres entre parenthèses notés en indice au cours de cet article se réfèrent à la bibliographie placée en fin de texte.)**

Pendant la guerre de 1940, les efforts effectués pour maîtriser les longueurs d'onde inférieures au mètre ont permis l'utilisation de dispositifs plus précis en leur associant des antennes plus directives. Par exemple, à côté du réseau de déclenchement d'alerte presque continu qui fonctionnait, en Grande-Bretagne, à partir de 1939 et qui, sur une longueur d'onde de 10 m, puis de 1,5 m, décelait les avions jusqu'à 100 km des côtes sud et est, les Britanniques développèrent les radars de bord qui utilisèrent des longueurs de 1 m, 30 cm, et apparurent dès la bataille d'Angleterre en 1940. Au sol, des progrès parallèles étaient effectués sur les radars de DCA (défense contre avions) et de tir en général.

Pendant ce temps, aux États-Unis, les laboratoires du MIT (Massachusetts Institute of Technology) développaient considérablement la théorie et la technologie du radar, et des ouvrages édités en 1945 servent encore de documents de base.

Aujourd'hui, le choix d'une fréquence de fonctionnement pour un radar dépend de la *fonction* que l'on désire réaliser et de l'*encombrement* que l'on veut donner au système, en particulier dans le cas de radars embarqués. Le *tableau* I montre que les longueurs d'onde utilisées vont du domaine décamétrique (2 à 20 m pour les radars transhorizon à l'étude aux U. S. A. et en U. R. S. S.) au domaine optique (LIDAR). D'autre part, la *portée* d'un système radar peut varier de quelques mètres, dans le cas de la mesure de la vitesse d'une automobile susceptible d'une contravention pour excès de vitesse, à plusieurs millions de kilomètres, dans le cas de l'atterrissage automatique d'un vaisseau spatial sur une planète. La puissance des sources correspondantes variera de quelques dizaines de milliwatts à des centaines de mégawatts. Le problème de la portée d'un radar est lié à celui de la réception de signaux très faibles. En effet, plus la fraction d'énergie qui vient l'éclairer est faible, et d'autant moins intense sera la




◀ *Figure 1 : coordonnées d'une cible (voir développement dans le texte).*

proportion d'énergie captée par le radar en retour.

L'antenne, élément du radar le plus connu, car le plus visible, a pour but d'envoyer de l'énergie dans un secteur donné de l'espace. On définit le *gain de l'antenne* G (θ, φ) par le rapport entre l'énergie émise par cette antenne dans une direction donnée et celle qui serait émise dans cette direction par une antenne isotrope, c'est-à-dire qui rayonne des ondes identiques dans toutes les directions. La densité d'énergie rayonnée par une telle antenne, reliée à une source d'énergie $E_s$, dans la direction (θ, φ), *figure* 3, est par unité d'angle solide :

$$\frac{dE}{d\Omega} = \frac{E_s}{4\pi} G(\theta, \varphi)$$

A la réception de l'écho, l'antenne recueille une énergie :

$$E_r = \frac{G\lambda^2}{4\pi}\frac{dE}{dS}$$

où S est la surface de l'ouverture,
G le gain maximal d'une ouverture plane à loi d'éclairement uniforme,
λ la longueur d'onde utilisée.

On pose $\Sigma = \frac{G\lambda^2}{4\pi}$, c'est la *surface effective de l'antenne*. Parallèlement, on définit la faculté de rayonnement d'une cible par sa *surface équivalente* σ égale au rapport entre l'énergie réémise par la cible dans la direction du radar et la densité d'énergie qu'elle reçoit. σ varie de 0,1 m² à une centaine de m² selon l'importance de la cible envisagée.

L'*équation de propagation du radar* relie l'énergie reçue par le radar $E_r$ à la puissance crête $P_c$ émise par ce dernier pendant la durée d'une impulsion τ :

$$E_r = \frac{P_c \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L}$$

où D est la distance radar-cible, et où L est un coefficient d'atténuation qui regroupe toutes les pertes (propagation dans l'atmosphère, circuits hyperfréquences, traitement du signal dans le récepteur, extraction du signal, exploitation, mouvement de l'aérien). Un exemple numérique emprunté à l'ouvrage de J. Darricau [(2)] montre que la puissance crête des signaux reçus est égale à $0{,}25 \cdot 10^{-13}$ W dans le cas où :

$P_c = 1$ MW, $\tau = 4\ \mu$s, G = 40 dB, σ = 3 m², L = 8 dB, D = 300 km, λ = 10 cm

Cette puissance est très faible, le récepteur radar doit donc être très sensible. Or on démontre que la puissance de bruit d'un récepteur (sans tenir compte du filtrage) est du même ordre de grandeur.

D'autre part, la cible fluctue. Le signal reçu n'est donc pas constant dans le temps. Le bruit a trois effets : il se superpose au signal utile et le noie, il crée de fausses indications, ou « fausses alarmes », il déforme le signal et rend donc plus aléatoire l'identification d'un signal utile. En conséquence, on définit une *probabilité de détection* (probabilité de voir une cible où elle existe réellement) et une *probabilité de fausse alarme* (probabilité de voir une cible là où il n'y a rien). Ces deux facteurs caractérisent la qualité de réception d'un radar et sont reliés directement au rapport :

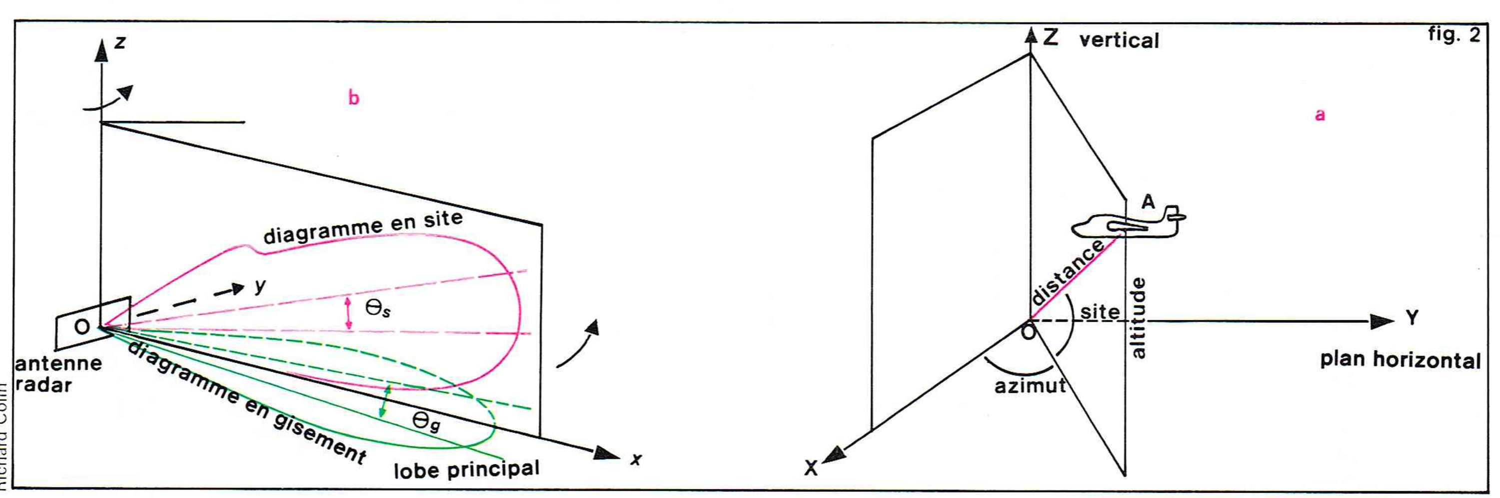
$$\frac{S}{B} = \frac{\text{Puissance crête du signal moyenne fréquence après filtrage}}{\text{Puissance moyenne du bruit moyenne fréquence après filtrage}}$$

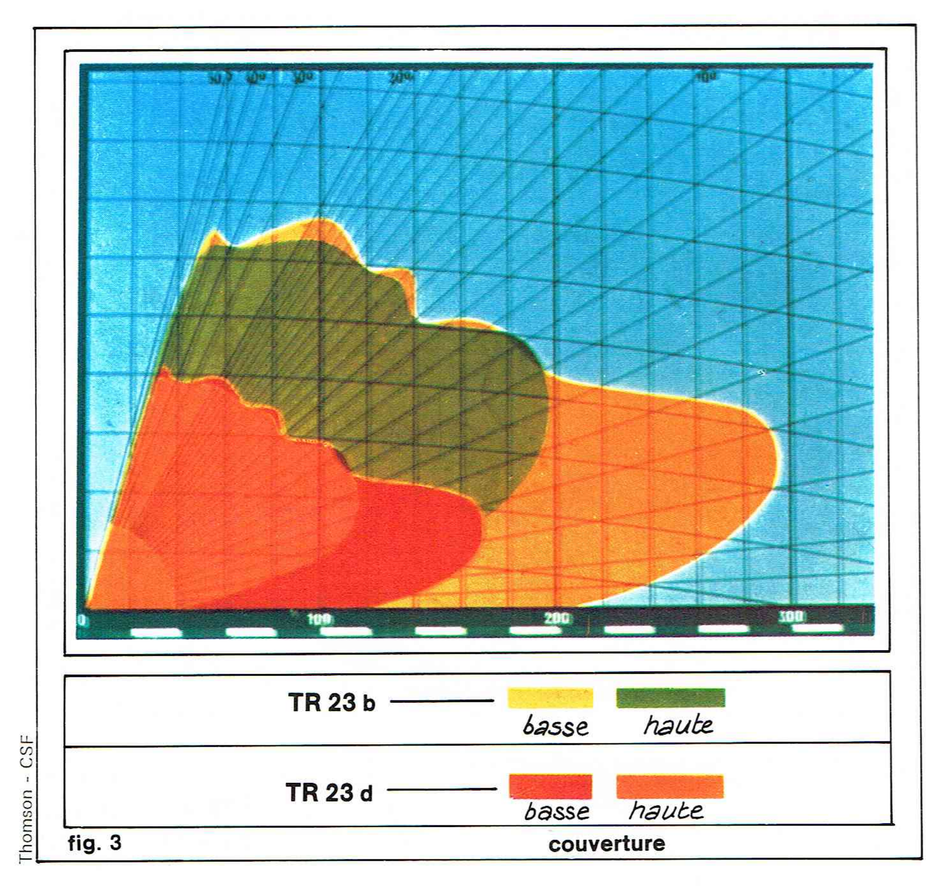
Le signal composite reçu est donc aléatoire, et, dans le dessein d'améliorer le rapport S/B, on utilise des radars émettant plusieurs impulsions [(2)]. Compte tenu de la *largeur des impulsions* et de la *vitesse des cibles*, on peut considérer que l'instant d'apparition de chaque écho, correspondant à chaque impulsion, est invariable pendant un grand nombre d'impulsions. L'intégration de ce groupe d'échos issus d'une même cible, appelé *plot*, améliore le rapport S/B. Dans les cas simples, cette intégration se fait grâce à la rémanence des écrans utilisés pour la visualisation.

Dans d'autres cas, un système appelé *extracteur* a pour but de trier les informations et de fournir pour un calculateur un message concernant les plots détectés. Quelles sont les informations qu'un radar peut alors fournir soit à un contrôleur humain, soit à un calculateur ? Un radar de surveillance délivre l'information d'existence ainsi que l'*azimut* et la *distance* de la cible. Or il est aussi indispensable de connaître l'*altitude* de l'écho par rapport au sol, ce qui revient à trouver l'*angle de site* de la cible. Pour préciser ce dernier, on sera amené à définir le *diagramme de rayonnement de l'antenne en site* et *en gisement* respectivement (*fig.* 2). La *figure* 3 montre le diagramme de couverture de l'antenne de la photo. Enfin, la *vitesse* du mobile et son *identité* sous forme d'un code seront fournies si c'est nécessaire.

Le schéma de la *figure* 4 montre un « système radar » destiné à répondre aux besoins du contrôle du trafic aérien d'un aérodrome. Il est constitué de l'ensemble (a) proprement détecteur de signal et de l'ensemble (b) traitement du signal et visualisation, les deux étant reliés par des lignes de transmission (c) : lignes téléphoniques, câbles, faisceaux hertziens. Il s'agit essentiellement d'un radar de veille.

▼ *Figure 2 : a, schéma permettant de définir les informations fournies par un radar azimut, distance, altitude et site de la cible ; l'angle de gisement est l'angle que fait la direction OA avec le nord ; b, en vert, diagramme de rayonnement de l'antenne en site (défini dans le plan xOz) ; en rouge, diagramme de rayonnement de l'antenne en gisement (défini dans le plan xOy), l'antenne étant centrée en O dans le plan yOz, c'est-à-dire perpendiculaire à Ox.*






▲ *Figure 3 : diagramme de couverture (en site) de l'antenne (plan xOz) de la photo de la page 96.*

▼ *Figure 4 : système radar permettant le contrôle du trafic aérien d'un aéroport.*

Les autres fonctions que peut assurer un radar sont résumées dans le *tableau* II. Le diagramme fonctionnel applicable à l'ensemble de ces radars est donné sur la *figure* 5. Un exemple de radar de surveillance est donné par celui d'Orly dont les caractéristiques sont les suivantes : fréquence 35 GHz ; puissance de crête 10 kW ; durée d'impulsion 0,03 µs ; fréquence de récurrence 15 kHz ; facteur de bruit du récepteur > 16 dB ; l'antenne tourne à 750 tours/minute. Nous nous proposons de passer en revue chaque élément et de décrire succinctement les modalités de réalisation imposées suivant les impératifs requis.

## Les émetteurs radars

L'élément principal est la **source** hyperfréquence ; elle est constituée soit d'un émetteur oscillateur de puissance seul, soit d'un émetteur suivi d'une chaîne amplificatrice. L'oscillateur est soit un tube (magnétron, klystron, carcinotron, triode ou tétrode), soit un dispositif à semi-conducteur (diode GUNN). L'amplificateur est soit un tube (tube à onde progressive), soit un amplificateur paramétrique.

Le choix de la source conditionne la conception générale de l'équipement : par exemple, suivant la portée désirée, on utilisera un magnétron de forte puissance (2 MW de puissance de crête pour 120 milles nautiques de portée, soit 220 km) ou une diode émettant une faible puissance (50 mW pour 100 m de portée). La fréquence d'émission du magnétron est située dans la bande 1 215-1 370 MHz, ce qui correspond à des dimensions des guides rectangulaires de sortie de l'ordre de 20 cm, les dimensions du magnétron étant 1,77 × 1,41 × 0,91 cm. La puissance requise à partir d'un secteur 220/360 V et 50/60 Hz est de 45 kW nominal. Il est refroidi par un courant à liquide.

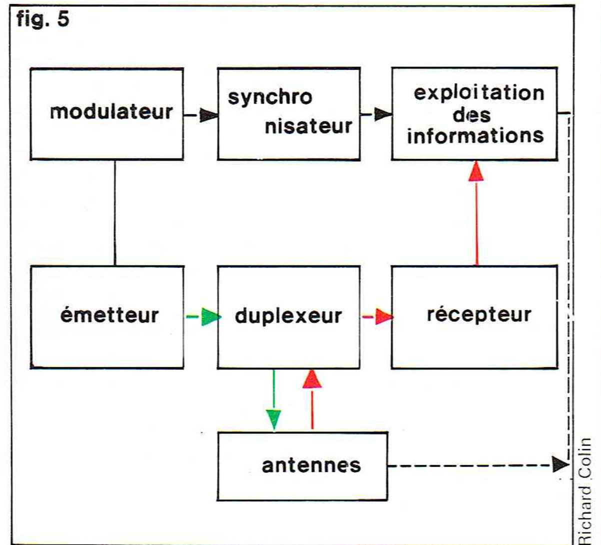
Dans le cas du radar portable, la diode fonctionne à 9 300 MHz ; les dimensions du guide sont de l'ordre de 2 cm, les dimensions de la diode seule étant millimétriques, celles de son boîtier identiques à celles du guide. La tension d'alimentation est de 120 V, la

DÉTECTION a
antenne secondaire
antenne primaire
émetteur récepteur
multiplexeur
extracteur

DÉPORT c
faisceaux hertziens (portée optique)
câbles (3 km)
lignes téléphoniques (toutes distances)

fig. 4
TRAITEMENT ET VISUALISATION b
démultiplexeur
décodage passif/actif
données analogiques
extracteur
transformateur d'images
données digitales
processeur spécialisé
convertisseur digital/t v
vidéo brute
vidéo brute + synthétique
vidéo brute en télévision
vidéo brute + synthétique en télévision
vidéo synthétique
télétype
mini calculateur
ordinateur
données procédurales ordres des contrôleurs

Richard Colin




puissance correspondante de l'ordre de 50 mW. Le lecteur trouvera la description détaillée de ces éléments de base dans les ouvrages [3] [4] de la bibliographie.

Le second élément de l'émetteur est le **modulateur** qui découpe l'onde hyperfréquence émise par la source et permet le fonctionnement en impulsion (*fig.* 6) : il élabore des signaux de synchronisation (c'est l'*horloge* du radar) ; il stocke l'énergie émise continûment par la source pendant le temps long séparant deux impulsions successives et la restitue pendant la durée brève d'une impulsion ; enfin, il met en forme l'énergie délivrée au tube de façon que le signal ait la forme désirée. Cette double fonction de réservoir et d'interrupteur est réalisée grâce à des technologies différentes suivant le niveau des puissances émises ; le stockage est effectué soit dans une capacité, soit dans une ligne à retard. En ce qui concerne l'interrupteur, on utilisera soit un tube à vide (tube dur) [*fig.* 7], soit une bascule à thyristors.

## *Le duplexeur*

C'est un commutateur électronique qui ouvre la voie au signal émis dans le sens émetteur-antenne et la ferme dans le sens émetteur-récepteur ; inversement, il ouvre la voie au signal reçu dans le sens antenne-récepteur et la ferme dans le sens antenne-émetteur. Sachant la faible énergie associée à un écho et la forte puissance émise par le radar, on comprend que l'isolement entre ces voies doit être draconien. Les commutateurs doivent fonctionner à chaque impulsion (tubes alternats = TR).

## *L'antenne ou aérien*

Partie spectaculaire du radar, elle définit, par son *diagramme*, le volume de l'espace observé, et concentre l'énergie de l'émetteur dans cette direction (*fig.* 2b et 3). Sa construction requiert des connaissances en mathématiques pour l'application des lois de propagation des ondes électromagnétiques, des connaissances en mécanique et en automatique (asservissements). Ses dimensions dépendent de la fréquence utilisée : en reprenant les exemples décrits à propos des émetteurs, on voit qu'au magnétron émettant dans la bande L est associée une antenne de dimensions 9 m × 13 m ; à la diode GUNN émettant dans la bande correspond une antenne type Comet de dimensions 12 cm × 8 cm × 5 cm.

Le *tableau* III montre les différents types d'antenne. La polarisation du signal émis est fixée par la source de l'aérien. Le choix entre *polarisation horizontale* et *verticale* est déterminé en fonction du terrain, (le sol réfléchissant les ondes électromagnétiques) lorsque l'on désire une couverture régulière. La *polarisation circulaire* est préférée s'il est utile d'éliminer les nuages et la pluie. Pour explorer l'espace, on recourt à un déplacement mécanique de l'aérien. La vitesse de rotation de l'antenne N est liée à la durée d'impulsion $\tau$ et à la fréquence de récurrence $f$ : si $\tau = 1{,}5\ \mu s$ et $f = 750$ Hz, N = 15 t/mn ; si $\tau = 0{,}03\ \mu s$, $f = 15\,000$ Hz, N = 750 t/mn.

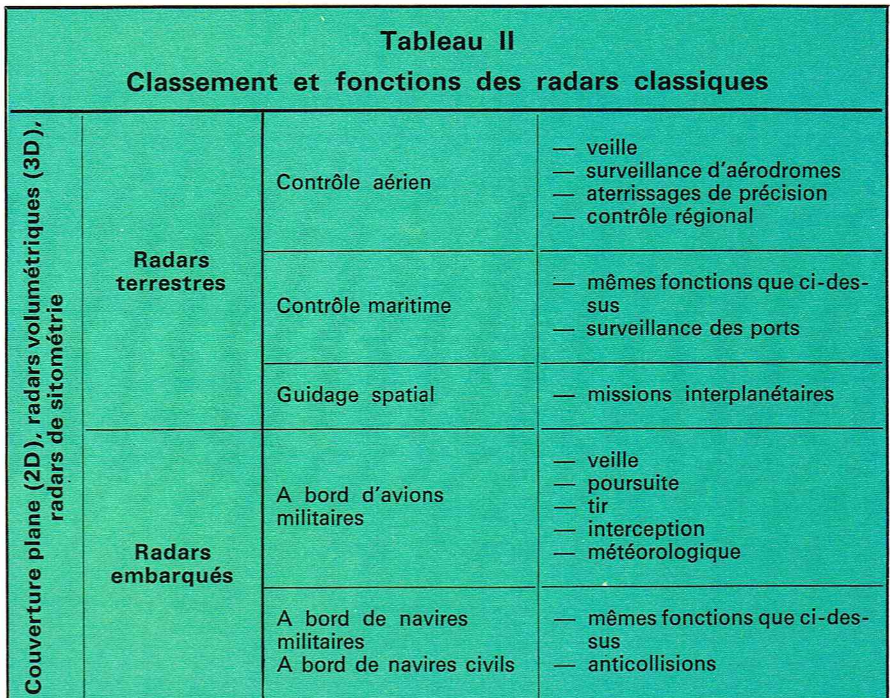
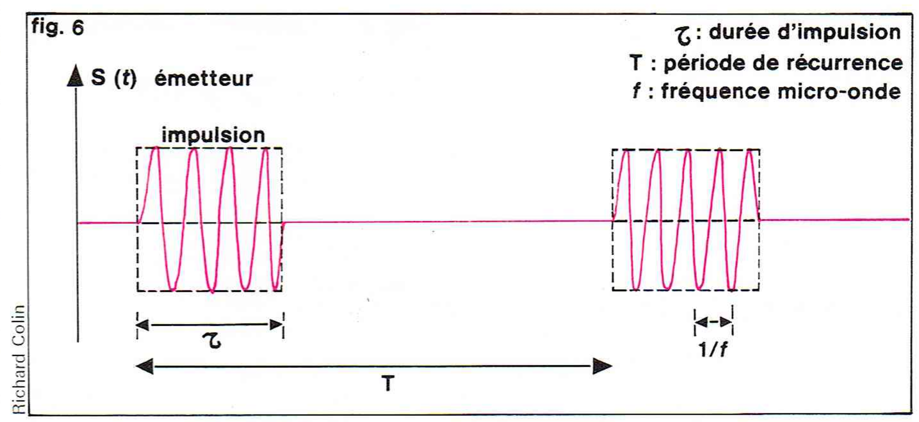
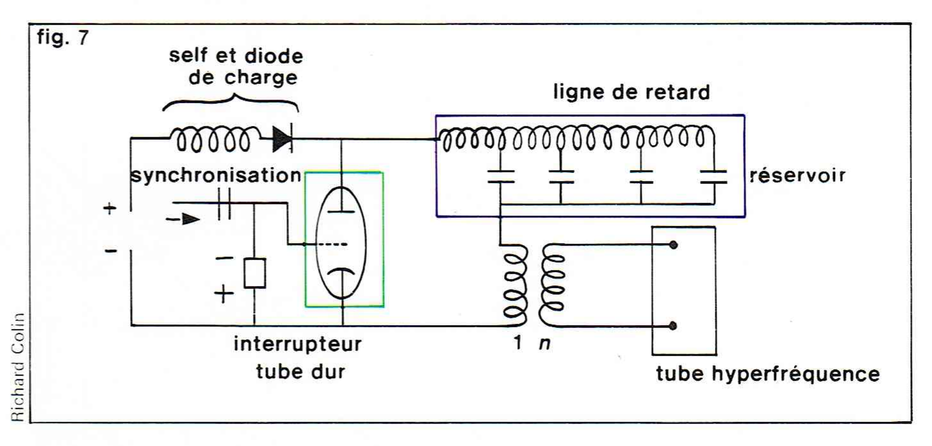


**Tableau II**
**Classement et fonctions des radars classiques**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Couverture plane (2D), radars volumétriques (3D), radars de sitométrie | Radars terrestres | Contrôle aérien | — veille<br>— surveillance d'aérodromes<br>— aterrissages de précision<br>— contrôle régional |
| | | Contrôle maritime | — mêmes fonctions que ci-dessus<br>— surveillance des ports |
| | | Guidage spatial | — missions interplanétaires |
| | Radars embarqués | A bord d'avions militaires | — veille<br>— poursuite<br>— tir<br>— interception<br>— météorologique |
| | | A bord de navires militaires<br>A bord de navires civils | — mêmes fonctions que ci-dessus<br>— anticollisions |




A côté d'une rotation autour d'un axe vertical, pour laquelle on utilise un faisceau étroit dans le plan de gisement afin d'avoir un bon pouvoir séparateur angulaire (*fig.* 2), où le volume d'espace exploré est torique, on peut avoir recours à un balayage conique de l'espace-radar à exploration conique utilisé pour la recherche et la poursuite des engins ; ou encore l'antenne radar peut être animée d'un balancement, sa plus faible ouverture étant dans le plan vertical : radar de site à balancement.

Or le déplacement mécanique de l'antenne dans l'espace peut limiter les performances des radars, et la mise au point du *balayage dit électronique* permet d'explorer une

***▲ Tableau II : classement et fonctions des radars classiques.***

***Figure 5 : diagramme de fonctionnement applicable à l'ensemble des radars classiques.***
***Figure 6 : signal émis par un radar à impulsions.***
***Figure 7 : schéma de principe d'un modulateur à tube dur.***

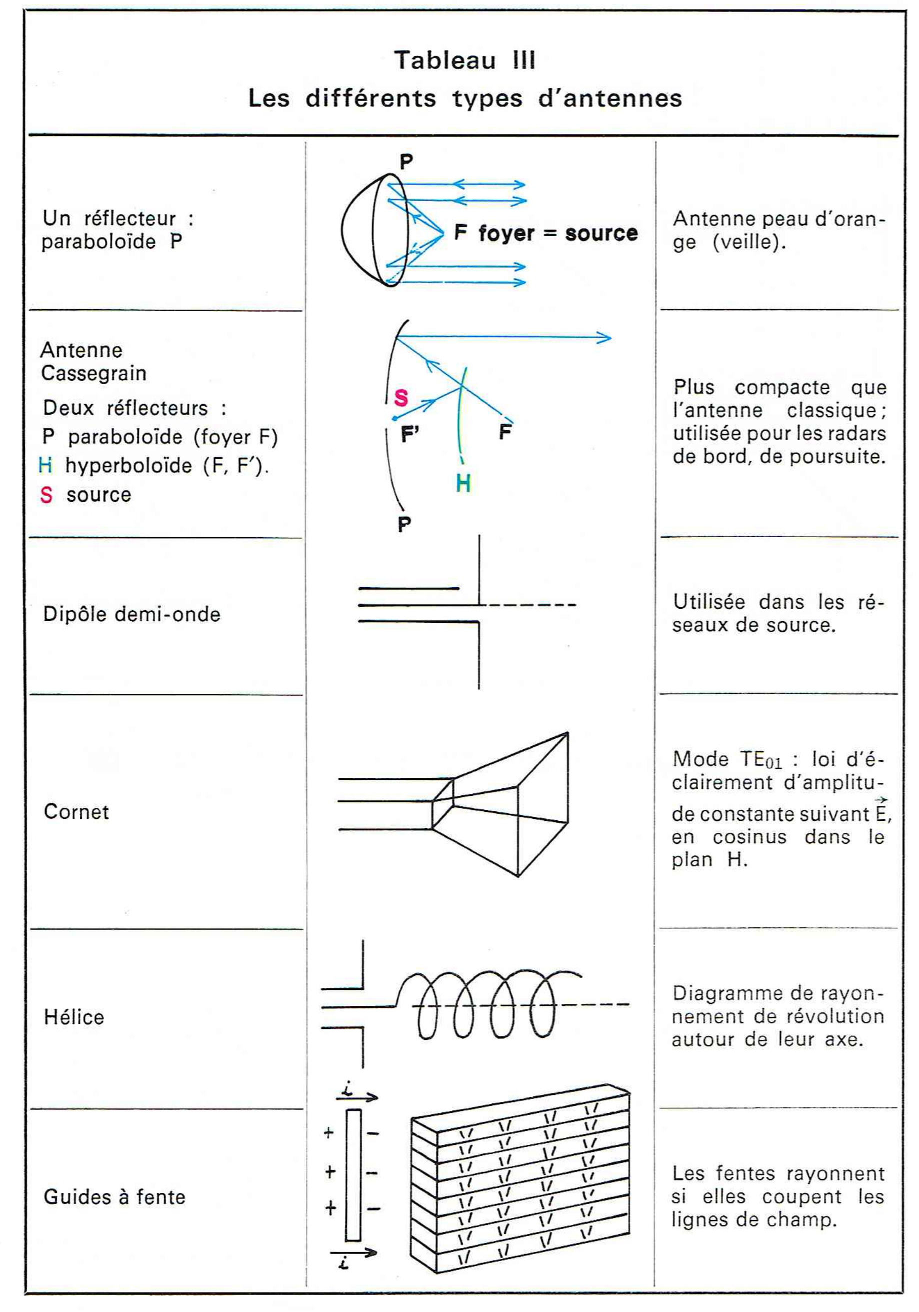
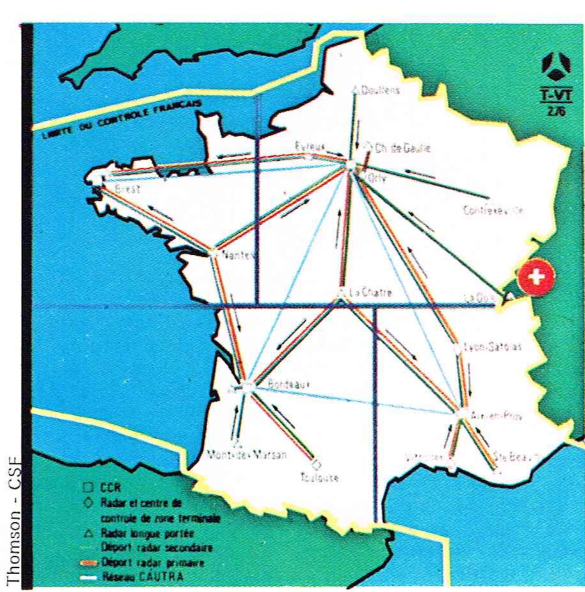


**Tableau III**
**Les différents types d'antennes**

| | | |
|---|---|---|
| Un réflecteur : paraboloïde P | P; F foyer = source | Antenne peau d'orange (veille). |
| Antenne Cassegrain<br>Deux réflecteurs :<br>P paraboloïde (foyer F)<br>H hyperboloïde (F, F').<br>S source | S; F'; F; H; P; P | Plus compacte que l'antenne classique; utilisée pour les radars de bord, de poursuite. |
| Dipôle demi-onde | | Utilisée dans les réseaux de source. |
| Cornet | | Mode $TE_{01}$ : loi d'éclairement d'amplitude constante suivant $\vec{E}$, en cosinus dans le plan H. |
| Hélice | | Diagramme de rayonnement de révolution autour de leur axe. |
| Guides à fente | i; + −; + −; + −; i | Les fentes rayonnent si elles coupent les lignes de champ. |

▲ *Tableau III : les différents types d'antennes.*




▶ *Carte des radars de contrôle régional pour la France.*

partie de l'espace (+ 60°, — 60° au maximum) en conservant l'antenne fixe. Dans le cas où l'aérien reçoit l'énergie d'un *réseau* ou groupe de sources rayonnantes d'amplitude et de phase différentes, le diagramme de rayonnement de l'antenne dépendra de la position de chaque source, de l'amplitude et de la phase du signal qu'elle émet. En conséquence, commander électroniquement la phase de chaque source revient à contrôler le diagramme de rayonnement de l'antenne. Comme il n'est pratiquement pas nécessaire de contrôler la phase (définie à $2\pi$ près) des différentes sources avec une grande précision, on peut quantifier la phase contrôlée. On dira que le déphasage est à $n$ bits si les valeurs successives possibles diffèrent de $\frac{\pi}{2^{n-1}}$. Cependant, la ressemblance du diagramme expérimental avec le diagramme calculé dépend de la valeur de $n$ et du nombre N de sources.

S étant la surface de l'antenne, $\lambda/2$ la demi-longueur d'onde, chaque source a des dimensions maximales de l'ordre de $\lambda/2$; dans ce cas

$$N = \frac{S}{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2} = \frac{4\,S}{\lambda^2}$$

On se rapprochera du diagramme théorique dans la mesure où $n$ sera petit et N grand. Si $S = 1\ m^2$, $\lambda = 0{,}05$ m, $N \sim 1\,600$ sources; on peut prendre $n = 3$; $n$ variant de 2 à 6 dans la plupart des applications, une antenne à balayage électronique sera donc constituée des éléments suivants :

Les **sources** (d'émission et/ou de réception) sont une association de dipôles ou d'hélices dont le couplage, c'est-à-dire l'adaptation, doit être optimisé. Le nombre de sources rayonnant dans ce cas peut varier de quelques centaines à quelques milliers et un émetteur unique alimente alors l'ensemble des sources. Un projet à l'étude, appelé balayage électronique actif, vise à associer chaque dipôle à une source réelle (diode GUNN). L'intérêt est de pouvoir contrôler chaque source rayonnante. Mais alors, le prix de revient est beaucoup plus élevé que dans le cas du système passif (20 000 F le module au lieu de 3 000 F).

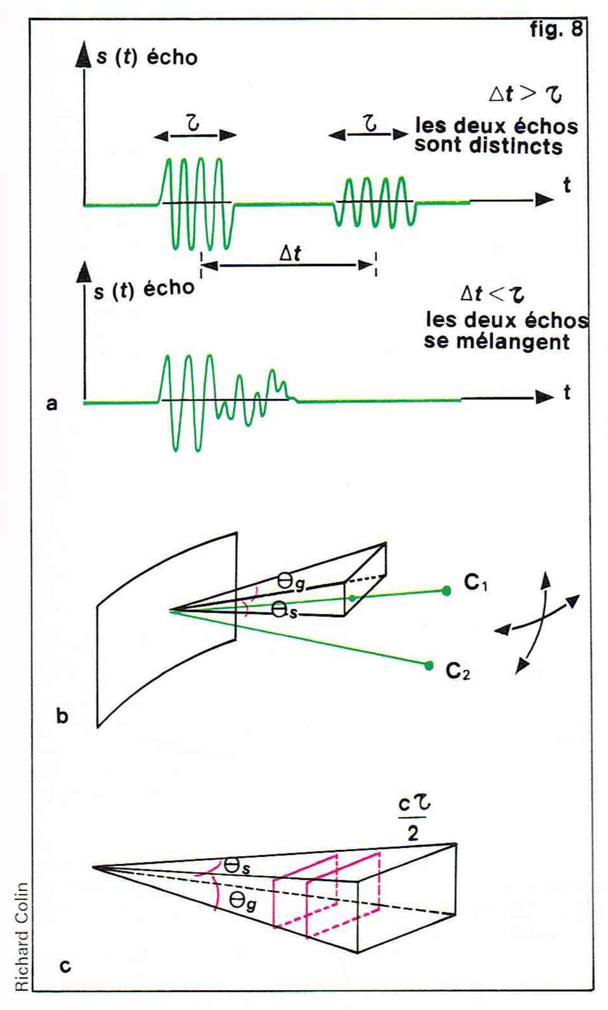
Les **déphaseurs** : ils utilisent tantôt des systèmes à ferrite, tantôt des diodes PIN. Les systèmes à ferrites sont lourds, volumineux et sensibles aux variations de température, mais supportent des puissances élevées et des pertes d'insertion faibles, tandis que les déphaseurs à diode PIN sont légers, peu encombrants, insensibles aux variations de température, mais résistent mal aux fortes puissances et présentent des pertes relativement élevées (environ 2 dB). Remarquons que ces pertes sont compensées par un gain plus élevé de l'aérien pour une surface donnée.

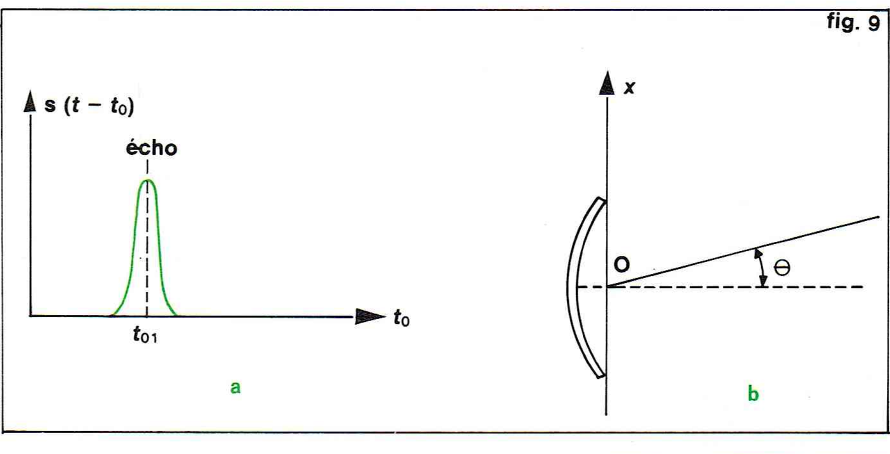
Réalisés sur des substrats d'alumine afin de réduire leur volume, les déphaseurs à diodes seront tantôt à *commutation :* dans ce cas, ils font circuler le signal dans des trajets de longueur différente suivant la commande $\left(\text{déphasage élevé égal à } \pi \text{ ou } \frac{\pi}{2}\right)$; tantôt ils seront à *perturbation*, et ramèneront sur la ligne de transmission des impédances variables (déphasage faible : $\frac{\pi}{8}$ ou $\frac{\pi}{4}\Big)$.

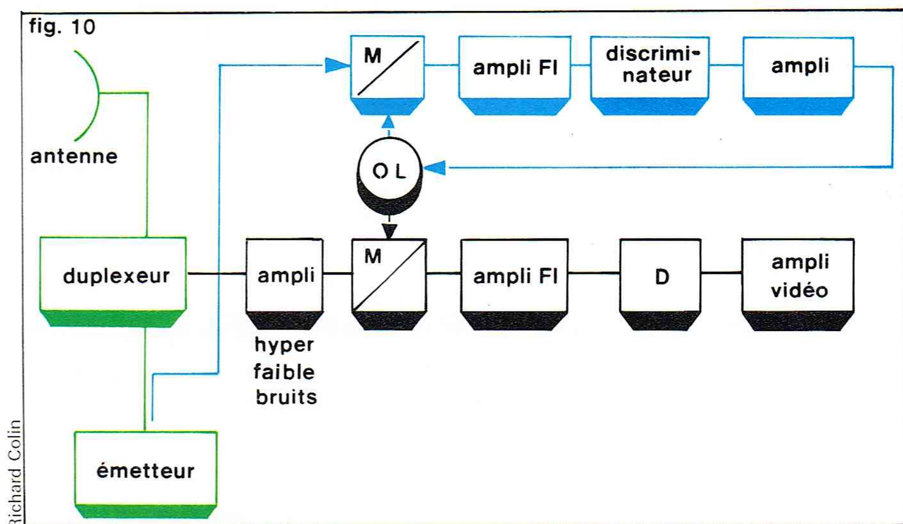
Une **alimentation** fait parvenir le signal de l'émetteur aux sources via les déphaseurs et au retour des sources au récepteur via les déphaseurs.

Un **système de calcul** pilote les déphaseurs et contrôle aussi la position du faisceau de l'aérien dans un temps faible devant la période de répétition du radar. Cette commande se fait à partir des informations fournies par le *récepteur du radar.*

Les antennes à balayage électronique équipent les systèmes embarqués *(Mirage)* et les radars de la Marine. Elles conservent des prix de revient très élevés dus au coût des déphaseurs et des moyens de calcul nécessaires à la commande et à la gestion de l'aérien. En résumé, le balayage électronique permet à un seul radar d'assurer les différentes fonctions (veille, poursuite, cartographie) de jour ou de nuit *sur une même antenne;* il ne faut que quelques secondes pour changer de cible (poursuite




multicible), ce qu'une antenne à déplacement mécanique ne peut effectuer. L'exploitation de l'espace reste limitée à 120° au maximum, ce qu'une antenne classique ne peut effectuer sans mouvements.

D'une façon générale, l'observation de l'espace définit les critères de performance des radars, et la *finesse de l'observation* sous-entend à la fois la *précision* avec laquelle le radar peut localiser une cible isolée — pratiquement, elle correspond à la détermination fine du centre du plot ou groupe d'échos — et le *pouvoir discriminateur* qui permet de séparer deux cibles voisines, et qui correspond à la dimension du plot. La *figure* 8a montre comment est défini le pouvoir discriminateur en distance : $\Delta t$ étant l'intervalle de temps qui sépare deux échos de durée $\tau$ à la réception, si $\Delta t > \tau$, les échos sont bien séparés; si $\Delta t \leqslant \tau$, les échos se mélangent pour former un signal composite : le radar ne peut plus distinguer les deux cibles; tout se passe comme s'il n'y en avait qu'une seule. Le *pouvoir discriminateur en distance* est alors égal à $\Delta D = \frac{c\tau}{2}$ où *c* est la vitesse de la lumière.

Le *pouvoir discriminateur angulaire* distingue deux cibles $C_1$ et $C_2$ séparées d'un angle tel qu'elles ne puissent se trouver simultanément dans l'angle solide $\theta_s\theta_g$, ceci par exemple dans le cas d'un balayage conique (*fig.* 8b). Le volume résultant (*fig.* 8c), à l'intérieur duquel deux cibles ne peuvent donner naissance à deux signaux distincts, est alors appelé *volume de confusion*.

Lorsqu'une cible est unique dans ce volume, avec quelle précision peut-on la localiser? La précision en distance est définie par l'erreur commise $\delta$ dans la mesure du temps $t_{01}$ centre de l'écho S $(t - t_0)$ (*fig.* 9a), soit $\sqrt{\overline{\delta^2}} = \frac{1}{2\pi B\sqrt{R}}$ où B est le « moment du second ordre » du spectre du signal utile émis, et R le rapport de l'énergie du signal dans le temps de la mesure à la densité spectrale de bruit. Pour obtenir l'écart type sur la mesure de la distance de la cible au radar, on multiplie $\sqrt{\overline{\delta^2}}$ par $\frac{C}{2}$ : à 1 µs correspond une précision en distance de 150 m. La précision angulaire (*fig.* 9b) est définie par la même formule, dite de Woodward.

Par exemple, si $\theta$ est l'angle en gisement de la cible qui, équipée d'un répondeur, émet un signal, on a :

$$\sqrt{\overline{\theta^2}} = \frac{1}{2\pi B_\nu\sqrt{R}}$$

où $B_\nu$ est le moment de second ordre de $|A(\nu)|$, $A(\nu)$ étant l'éclairement de l'antenne, $\nu$ la fréquence spatiale égale à $\frac{x}{\lambda}$.

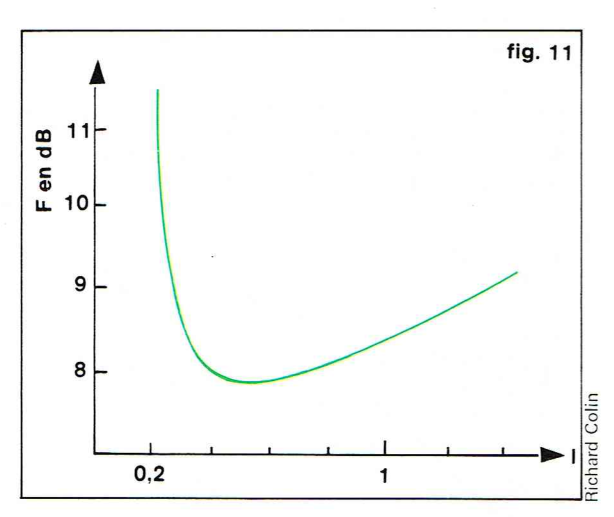
En conclusion, le pouvoir discriminateur dépend de l'aérien et de la durée de l'impulsion, la précision dépend de l'aérien et du bruit qui accompagne le signal : bruit atmosphérique, bruit propre du récepteur, brouillage dû à un ennemi. Le soin apporté à la réalisation du récepteur, l'élaboration de techniques comme celles du « monopulse d'amplitude » ou du « scanning » (2) améliorent la précision.

## Le récepteur

Le signal provenant de la cible est reçu par l'antenne et aiguillé vers le récepteur par le duplexeur. Le récepteur amplifie le signal et le rend exploitable. Sa fréquence est donc accordée sur celle du signal, sa bande passante adaptée afin de ne pas le déformer et de limiter le bruit transmis. Son gain est très élevé, puisque nous avons vu que la puissance du signal est de l'ordre de $10^{-14}$ watt : pour être traitée, elle doit être amplifiée jusqu'à quelques watts ou quelques dizaines de watts. Enfin, il doit présenter un facteur de bruit très faible — surtout en ce qui concerne les étages d'entrée — afin d'avoir une bonne sensibilité. Le schéma général d'un récepteur radar est donné sur la *figure* 10 : il est du type superhétérodyne, c'est-à-dire que le signal est transposé sur une fréquence

▲ ***Figure 8 :*** *pouvoir discriminateur d'un radar;* *a, pouvoir discriminateur en distance* $\Delta D = \frac{c\tau}{2}$; *b, pouvoir discriminateur angulaire;* *c, volume de confusion.*
***Figure 9 :*** *définition de la précision d'un radar;* *a, précision en distance* $\sqrt{\overline{\delta^2}}\, c/2$, $\delta$ *étant l'erreur commise sur la mesure de* $t_{01}$, *centre de l'écho;* *b, précision angulaire.*
***Figure 10 :*** *schéma synoptique du récepteur d'un radar (OL oscillateur local, M mélangeur, D détecteur; en bleu, le contrôle automatique de fréquence de l'oscillateur local).*

▶ *Figure 11 : variation du facteur de bruit F d'un mélangeur en fonction du courant de polarisation I (cas d'un mélangeur à cristal et diode à pointe de tungstène-silicium).*




plus basse appelé fréquence intermédiaire (FI ou $f_M$), cela afin d'éliminer le bruit de l'émetteur et des détecteurs.

**Amplificateur faible bruit à l'entrée :** il fixe la sensibilité du radar à sa valeur maximale. Ce peut être soit un tube à onde progressive, un amplificateur à transistor (transistor à effet de champ) ou à diode tunnel, ou un amplificateur paramétrique (varactor). Dans les radars anciens, cette amplification directe de l'onde hyperfréquence n'existe pas.

**L'oscillateur local** (de puissance continue de l'ordre de 1 mW) émet une onde à la fréquence $f_L$ peu différente de la fréquence signal $f_S$ telle que $f_L = f_S + f_M$; $f_M$ est fixe et de l'ordre de quelques dizaines de MHz. Un contrôle automatique de fréquence (CAF) aligne systématiquement la fréquence de l'oscillateur local sur la fréquence de l'oscillateur de puissance (magnétron par exemple) pour compenser les dérives de ce dernier. L'oscillateur local peut être un klystron, un carcinotron ou un dispositif à état solide : diode GUNN ou Impatt. On appelle *récepteur cohérent* un récepteur dans lequel la phase des signaux est conservée de l'émission à la détection (*fig.* 9). Dans la recherche d'une grande stabilité, des oscillateurs sont obtenus à partir d'un quartz par multiplication de fréquence et l'oscillateur local devient un vrai standard de fréquence. Les multiplicateurs à diode de commutation (Schottky, Snap off, avalanche) et les multiplicateurs à varactors réalisent des rapports de multiplication de 2 à 3.

Le **mélangeur** assure le changement de la fréquence $f_S$ en la fréquence $f_M = f_L - f_S$. Sa caractéristique de transfert n'est pas linéaire et, d'une façon générale, il peut délivrer des signaux de fréquence $pf_L + qf_S$. On le caractérise par sa perte de conversion $P_c$ ainsi que par le rapport :

$$r = \frac{\text{température de bruit en sortie du mélangeur}}{\text{température de référence}}$$

Le facteur de bruit F du mélangeur s'écrit $F = r \cdot P_c$. La *figure* 11 donne les variations de F en fonction du courant de polarisation I. Le minimum de cette courbe correspond à la sensibilité maximale du récepteur. D'autre part, pour diminuer le bruit du mélangeur, on éliminera le bruit de l'oscillateur local en construisant des mélangeurs symétriques et en supprimant la fréquence image $f_{IM} = f_S + 2 f_M$. Les types de diodes utilisés sont des diodes à pointes (Ge, Si) et des diodes à barrière (As Ga-Schottky), ces dernières étant plus performantes; elles acceptent des niveaux de puissance de l'oscillateur local de l'ordre de 0,1 mW au lieu de 1 mW pour la diode à pointe [2].

Les deux fonctions correspondant à l'oscillateur local et à la diode mélangeuse peuvent être effectuées par un seul et même dispositif appelé *oscillateur-mélangeur* où une diode unique (Impatt ou Barrit) assure les deux fonctions [5]; un dispositif très compact de ce genre est appliqué à la détection d'objets en mouvement ou plus précisément d'intrus.

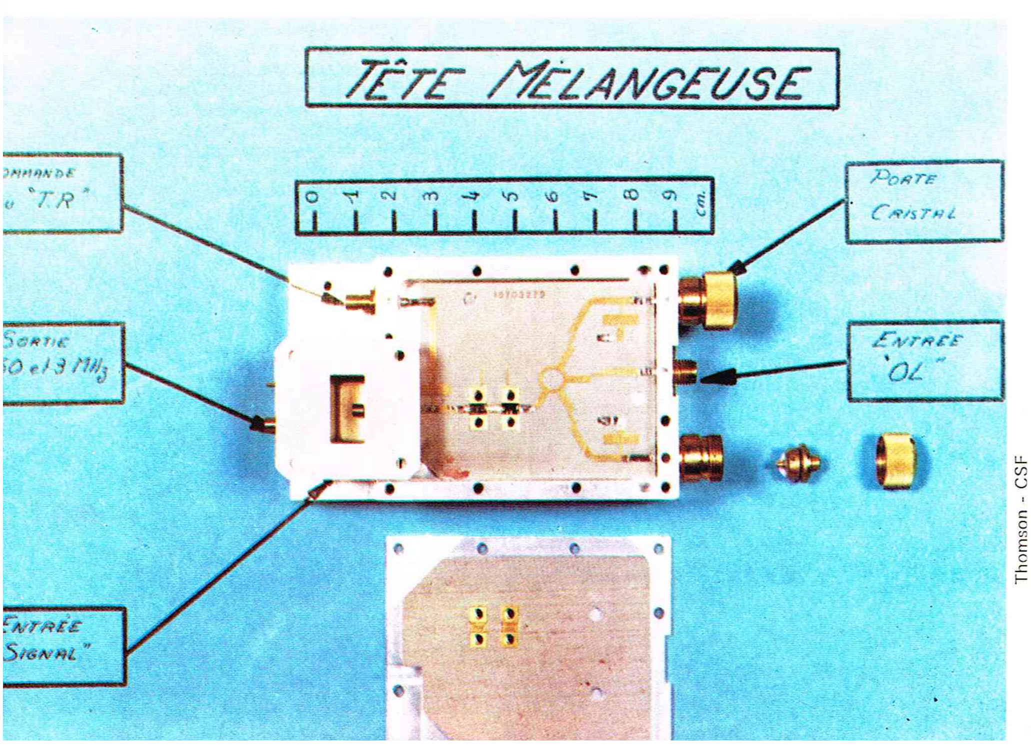
**Amplificateur à fréquence intermédiaire :** il a pour mission d'assurer la sélectivité : c'est donc un filtre passe-bande. N'oublions pas que le signal utile n'est pas seul, mais qu'il est superposé à des signaux parasites dus à des échos de sol, de mer, appelé « clutter ». Pour mieux voir les signaux utiles dans le « clutter », on utilise le fait que ces signaux correspondent à des cibles mobiles et sont alors affectés d'effet Doppler : il existe un écart de fréquence $\Delta f$ entre la fréquence émise $f_E$ et la fréquence signal $f_S$ reçue lorsque la cible est animée d'une vitesse V; $\Delta f$ est appelée fréquence Doppler; pour un émetteur fixe, elle est égale à $2 f_E \frac{V}{c}$ où $c$ est la vitesse de la lumière. Ce système nécessite l'emploi d'un amplificateur limité dans des dispositifs dits VCM ou MTI (Moving Target Indication) qui sont représentés sur les photos.

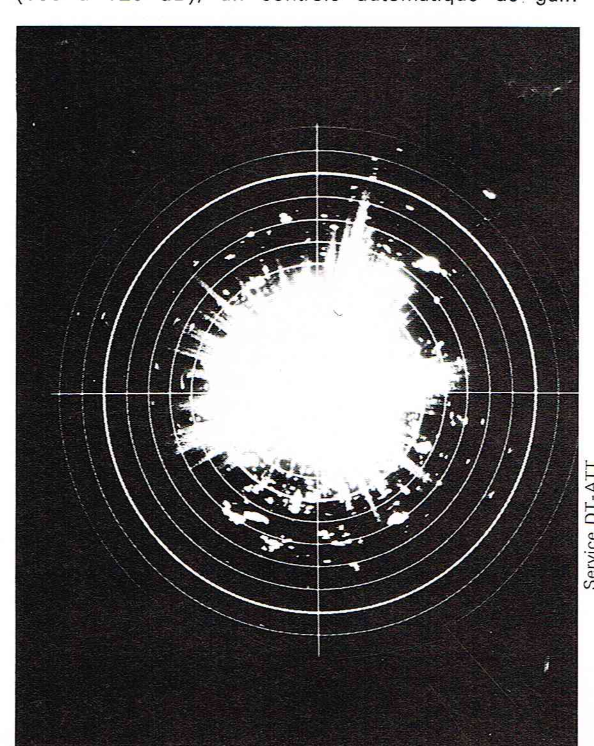
On peut aussi utiliser un *amplificateur logarithmique*. Soit $v_e$ la tension d'entrée d'un amplificateur et $v_s$ la tension de sortie. Si $v_s = a \log bv_e$, où $a$ et $b$ sont des constantes,

$$\Delta v_s = a \frac{\Delta v_e}{v_e}$$

Si $\Delta v_e$ est proportionnel à $v_e$, ce qui est vérifié pour des signaux de « clutter », la fluctuation $\Delta v_s$ de la tension de sortie devient indépendante de l'amplitude à l'entrée $v_e$. Autrement dit, on obtient des variations du niveau de sortie indépendantes du niveau moyen à l'entrée, favorisant ainsi les signaux utiles par rapport au clutter, au niveau de la fréquence intermédiaire. Nous verrons qu'après détection, d'autres dispositifs anticlutter sont prévus. L'amplificateur intermédiaire a un gain élevé (100 à 120 dB), un contrôle automatique de gain

▼ *Ci-dessous, une tête mélangeuse de récepteur radar en technologie triplaque. A droite et page 103 en bas à gauche, respectivement : écran sans traitement MTI (observer les signaux parasites); écran avec traitement MTI de sélection des signaux.*



(CAG), et comporte plusieurs étages. Afin de diminuer le clutter plus important pour les échos à distance faible, on équipe l'amplificateur d'un système de gain variable avec le temps (GVT) (6).

Dans le cas d'un brouillage intentionnel ou accidentel, on utilise des récepteurs dits à *taux d'alarme constant* (TFAC, prononcer téfac). Après amplification dans un amplificateur à large bande, le signal reçu est limité à un niveau inférieur à celui du bruit, puis filtré par un filtre adapté. La puissance de bruit en sortie de chaîne est alors indépendante de la puissance de bruit à l'entrée (2).

Le **détecteur** : il peut détecter soit l'amplitude, soit la phase du signal suivant le radar réalisé. Dans le cas de la détection d'amplitude, un système à diode restitue l'enveloppe des signaux moyenne fréquence d'amplitude crête variable. On appelle *détecteurs cohérents* ou *démodulateurs* les détecteurs fournissant la phase du signal.

**Amplificateur vidéofréquence** : à l'amplification du signal détecté s'ajoutent un certain nombre de traitements et, en particulier, d'autres dispositifs « anticlutter ». Précisons la nature des échos « clutter » ou « empilement d'objets quelconques ». Dans le cas d'une antenne qui balaie le sol, le relief du terrain donne des échos de longue durée, et l'on peut, dans certains cas, obtenir une carte très précise d'installations au sol et du relief.

En ce qui concerne les radars de navigation maritime, une protection efficace contre le clutter de mer devra être envisagée (mer agitée). Sauf dans les radars météorologiques où ils seront exploités, les échos dus aux nuages, à la pluie, seront éliminés (antenne à polarisation circulaire). On appelle *anges* des échos de « clutter » dont la nature est difficilement identifiable : oiseaux, insectes, inhomogénéités de l'indice de réfraction de l'air. Par exemple, sachant qu'un oiseau présente une surface équivalente à 0,01 m², un vol de groupe peut présenter un écho notable. Indiquons le principe d'un *discriminateur de durée d'impulsion* (DDI) : il a pour but de supprimer tous les signaux dont la durée est différente de $\tau$ (*fig.* 12).

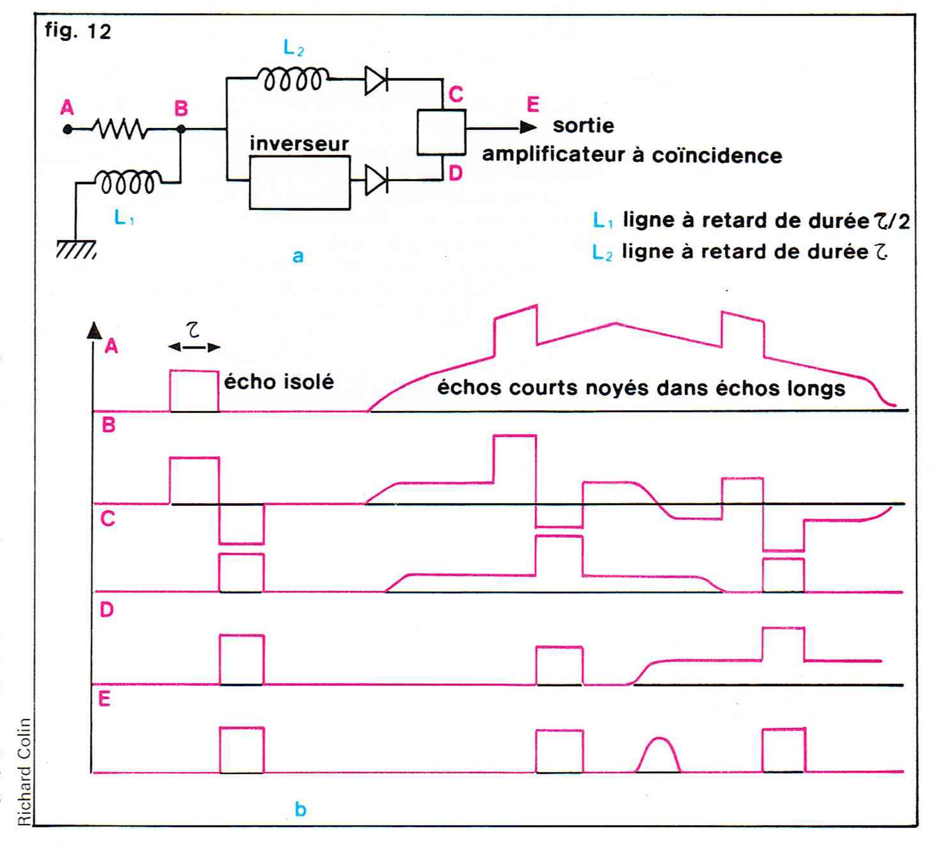
## *Visualisation des échos : l'indicateur panoramique* (IP)

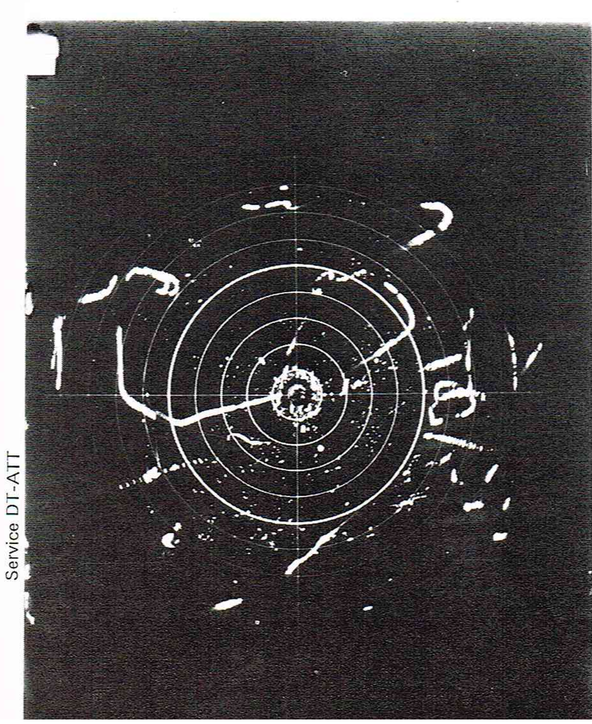
Le signal vidéofréquence délivré par le récepteur module le wehnelt d'un tube cathodique. L'indicateur magnétique à bobine fixe fonctionne suivant le principe décrit à la *figure* 13a, b, c. La photo montre un écran en vidéo. Un tel système permet le décentrement à volonté de la représentation, l'agrandissement d'une portion (effet de loupe) et l'inscription de caractères (*cf.* photo). Aujourd'hui, la visualisation multichrome permet de superposer sur l'écran la carte de navigation et l'image fournie par le radar météorologique : le changement de couleur est obtenu par une variation d'énergie du faisceau électronique avec le *tube à pénétration de faisceau*. Ces tubes sont capables de fonctionner dans une ambiance lumineuse très élevée.

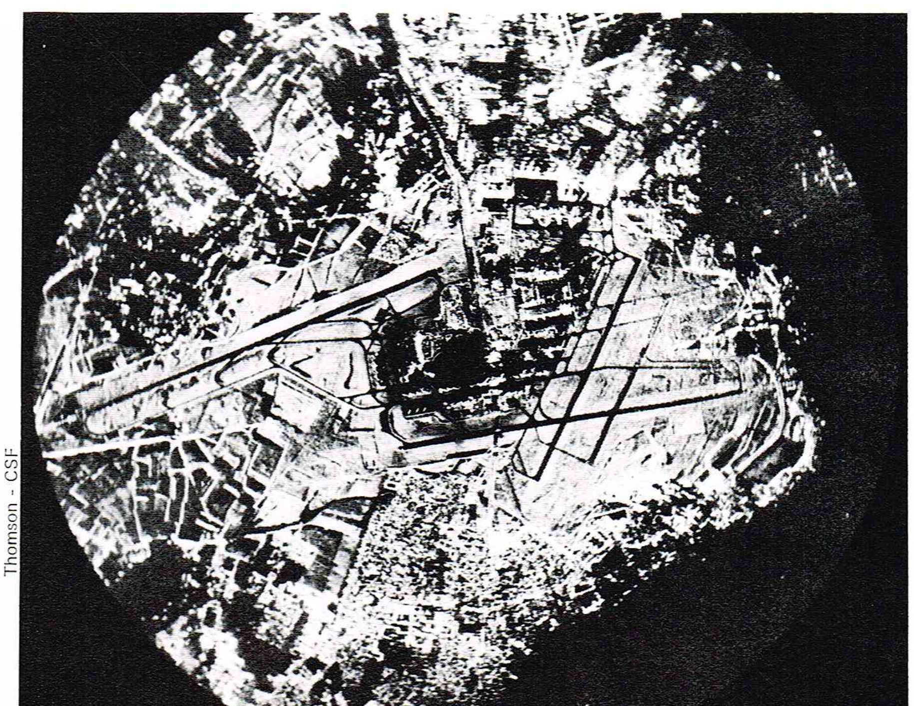
Le balayage d'une image radar, par exemple pour un radar de veille panoramique, est un balayage en coordonnées polaires $\rho$ et $\theta$ où le déplacement angulaire $\theta$ se fait à une vitesse lente en général, synchrone de celle de l'antenne. Pour que l'image sur l'écran de l'indicateur soit exploitable, on utilise des tubes à grande rémanence, d'une part, et, d'autre part, la conversion de l'image radar en *image télévision* (tube transformateur d'image).

## *L'extracteur*

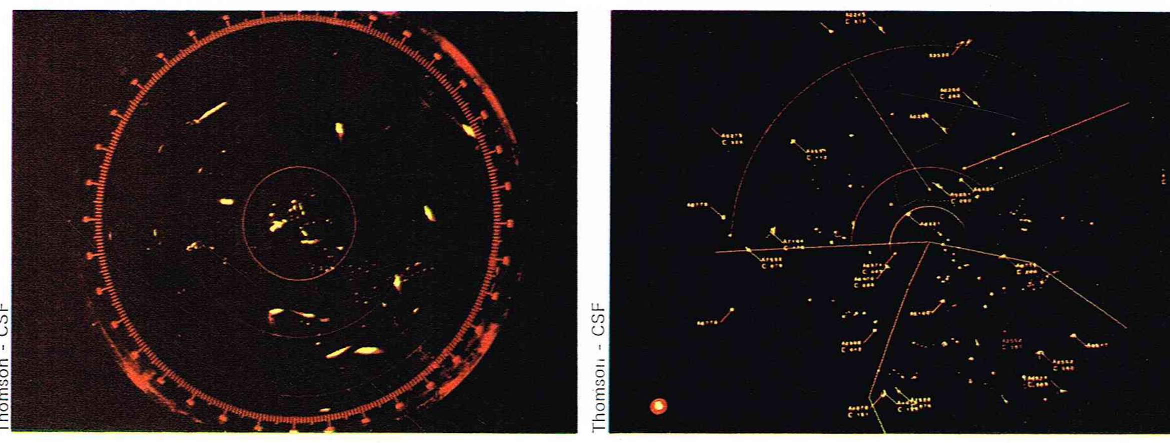
L'exploitation des informations renouvelées à une cadence élevée dépasse les possibilités de l'opérateur humain, elle est donc confiée à un calculateur électronique, l'homme intervenant pour surveiller, contrôler, compléter. Les nombreux signaux sont transmis au calculateur, qui en assure l'exploitation automatique, par *l'extracteur,* lequel extrait des signaux vidéo les échos utiles en éliminant le bruit. Le schéma de la *figure* 14 montre la situation de l'extracteur dans la chaîne radar.



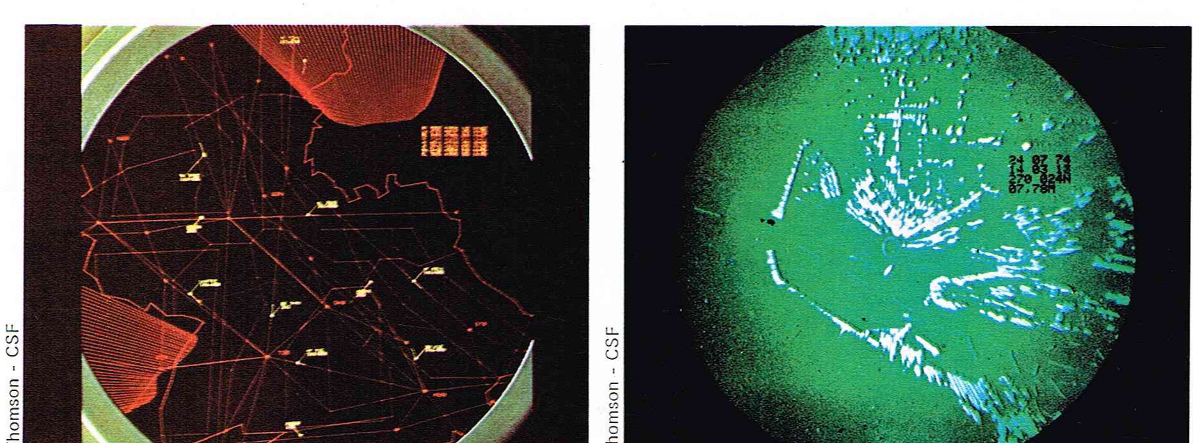



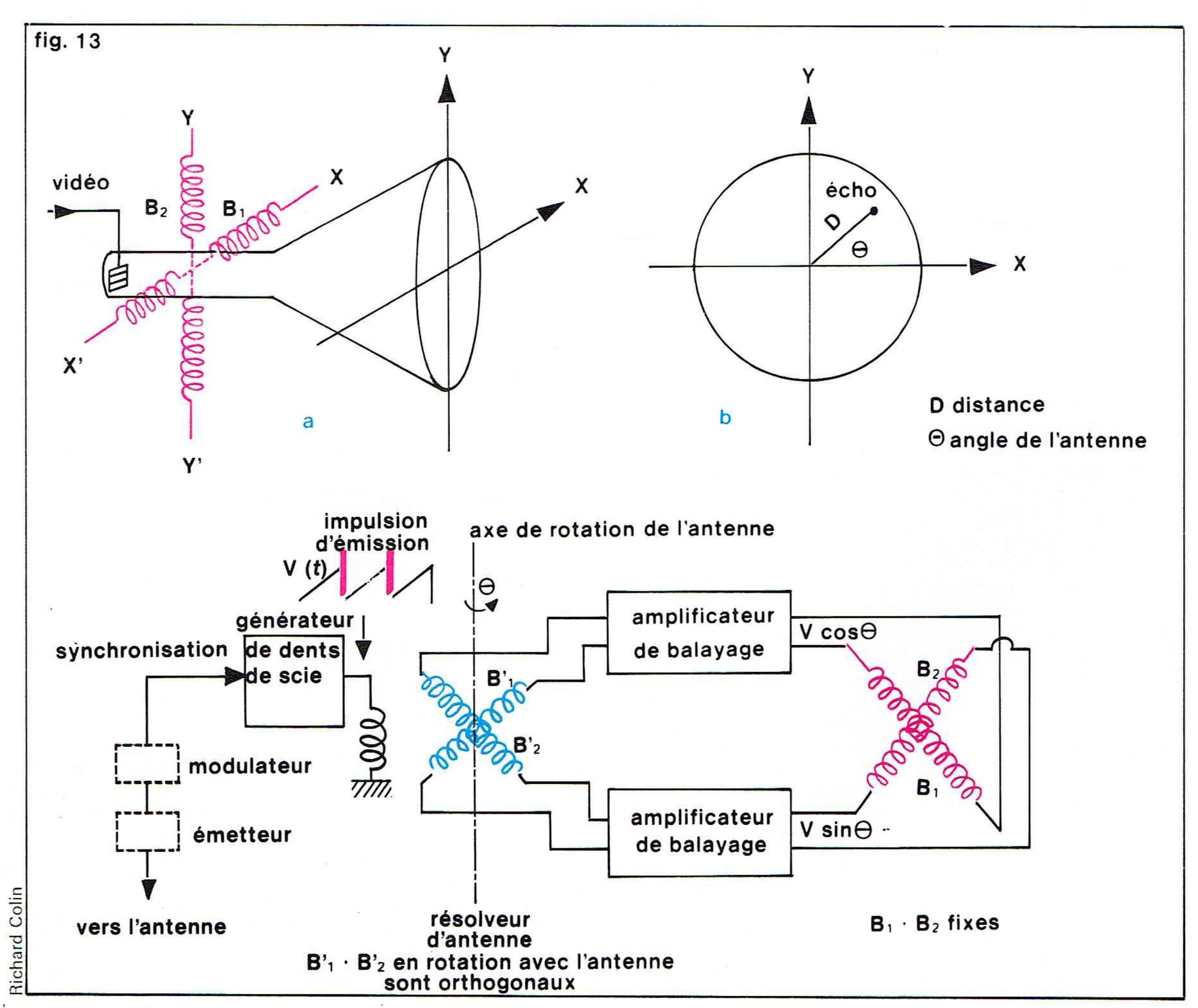

*▼ Figure 12 : a, schéma de principe du discriminateur de durée d'impulsion ; b, différentes étapes de la suppression des signaux de durée différente de $\tau$. En bas, image radar Decca de l'aéroport de Paris-Orly ; la zone d'ombre vers la droite correspond à la vallée de la Seine.*



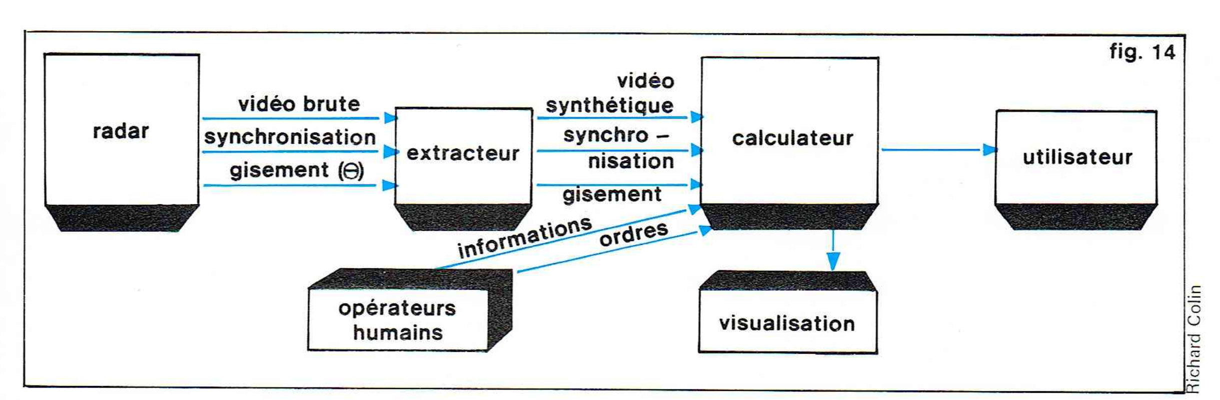

▶ *A gauche, image vidéo brute d'un radar primaire et secondaire. A droite, image vidéo brute plus synthétique (le radar secondaire est décodé automatiquement).*




▶ *A gauche, image de radar couleur (non opérationnelle) ; les coordonnées sont X, Y au lieu de φ, θ ; les zones colorées indiquent les zones de perturbation. A droite, image radar télévision plus synthétique montrant la circulation dans le port du Havre.*




▶ *Figure 13 : indicateur panoramique à bobines fixes : a, tube cathodique et bobines fixes ; b, écran ; c, principe de fonctionnement.*




◀ *Figure 14 : la situation de l'extracteur dans la chaîne radar.*

Les différentes informations sont transmises en général sous forme binaire, et l'extracteur doit élaborer les signaux correspondants. La *figure* 15 rappelle les différents traitements que doit subir le signal, traitements qui, suivant que la mesure de fausse alarme sera faite sur la vidéo brute ébasée ou sur la vidéo quantifiée, appartiendront soit au récepteur, soit à l'extracteur. Les échos ainsi obtenus sur plusieurs récurrences sont mis en mémoire, et on compare les échos ainsi obtenus (*fig.* 16). Le nombre de récurrences sur lequel s'effectue cette corrélation dépend du radar. Si la cible reçoit une moyenne de 5 impulsions, on prendra comme entrée 3 impulsions sur 5 pour maintenir le groupe d'échos correspondant, ou *plot* [7] [8].

## *Le calculateur*

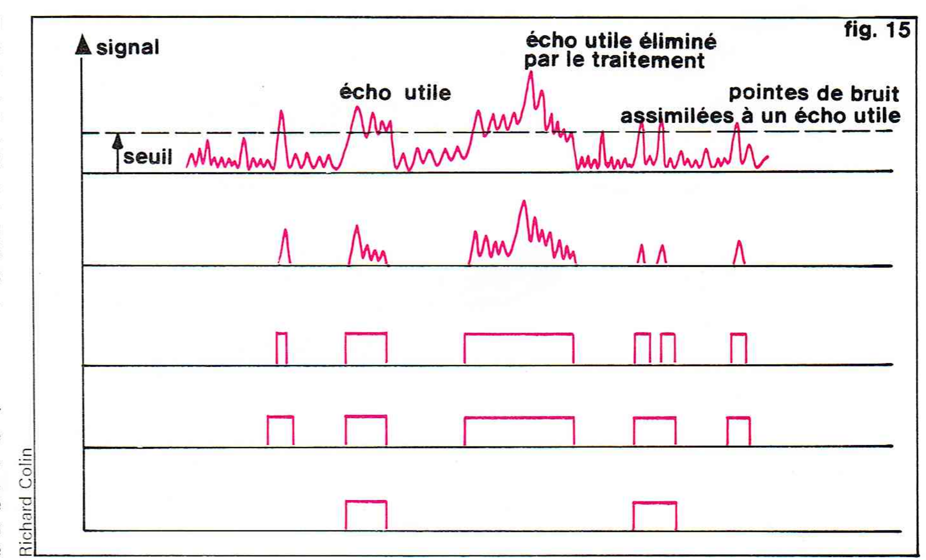
Il assure l'exploitation automatique. C'est un calculateur arithmétique programmé, qui, dans le cas du contrôle de la circulation aérienne, fournira : la distance ρ, l'azimut θ, mais aussi d'autres messages : IM (identité militaire), D (détresse militaire), PF (plot fictif), SPI (identité civile), etc. En particulier, le calculateur déterminera à partir d'un plot correspondant à une cible sa trajectoire en fonction du temps, connaissant sa vitesse maximale. L'exploitation des pistes connues permet une prévision, et si un risque de collision apparaît, les ordres nécessaires sont immédiatement transmis.

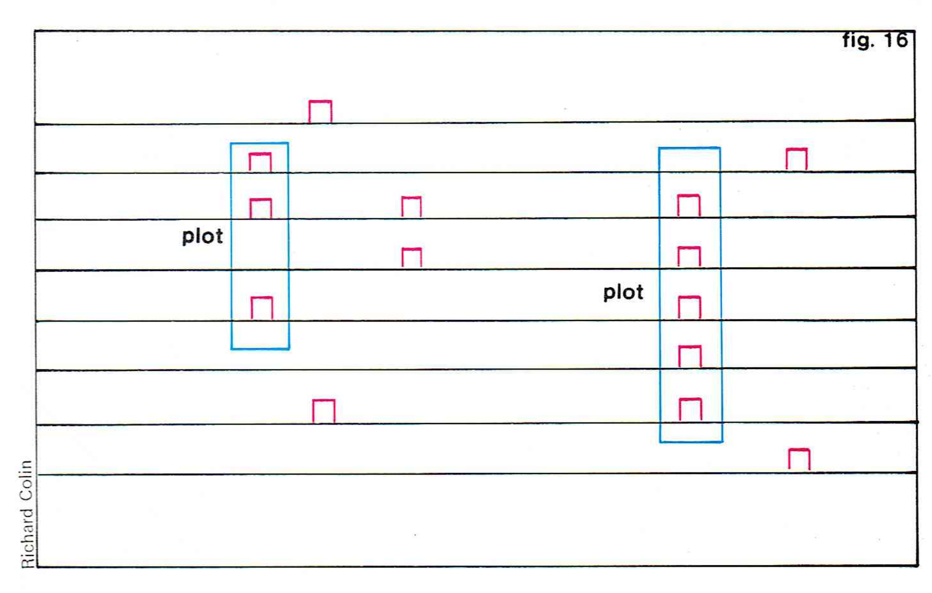
L'évolution des radars s'opère à la fois dans le dessein d'améliorer les différentes caractéristiques des radars existants et dans celui de répondre à des besoins nouveaux, non seulement dans le cadre d'applications civiles, concernant le transport aérien ou maritime, ou d'applications militaires, mais encore dans le cadre des applications dites industrielles. En ce qui concerne l'amélioration des caractéristiques, l'augmentation de la probabilité de détection d'une cible fluctuante a été réalisée grâce au fonctionnement opérationnel, depuis un certain nombre d'années, des radars à diversité de fréquence [2]. Le *pouvoir discriminateur* en distance a été accru grâce à la mise en service du radar à *compression d'impulsions* qui, par exemple, pour une puissance crête de 250 kW, émettant des impulsions de 100 μs occupant un spectre de 1,2 MHz, a les mêmes performances qu'un radar classique émettant des impulsions de 1 μs sur une puissance crête de 25 MW [2]. Enfin, des procédés plus récents : *l'agilité de fréquence*, où on effectue un changement de fréquence d'une récurrence à l'autre, est une technique de « discrétion » qui augmente la puissance de brouillage. On se reportera aux ouvrages cités pour la description des autres techniques, qui sort du cadre de cet article.

Dans le domaine industriel, de multiples applications, en particulier du radar Doppler, ont été développées : système d'alarme contre les intrus dans une maison, contrôle de la vitesse des automobiles — et, dans ce domaine, la mise au point de radar anticollision est à l'étude [9] —, sûreté du personnel et contrôle des vitesses pour les chemins de fer; des applications dans la mécanique : contrôle des vibrations de turbines, de câbles de ponts suspendus, de la vitesse de pièces de différentes machines, etc.

En physiologie, les radars Doppler permettent de contrôler la respiration des êtres humains et, en particulier, des nouveau-nés placés en couveuse, la puissance rayonnée de l'ordre de 2,5 mW ne créant aucun effet biologique [10].

A côté de l'évolution des technologies concernant une bande de fréquence donnée, il faut signaler l'effort effectué pour augmenter la fréquence d'émission des sources. Aujourd'hui, des études appliquées au système à multiplication de fréquence ont mis au point des doubleurs 200 GHz (10,2 mW) et des tripleurs 300 GHz (2,1 mW) utilisant des varactors AlL. As Ga; cette montée vers les très hautes fréquences est illustrée par un système existant, le *« lidar »*, dans lequel l'émetteur est un *laser*. La conception et l'utilisation d'appareillages de télémétrie laser à moyenne et longue portée (3 000 km), effectuées par MM. Moreau et Vernet en 1969 en France, ont permis l'étude et la mise au point d'un




▲ *Figure 15 : les différents traitements subis par le signal radar. Figure 16 : définition d'un plot.*

| Tableau IV<br>Comparaison du radar et du lidar | | |
|---|---|---|
| **Caractéristiques** | **Radar** | **Lidar** |
| Angle solide dans lequel est concentrée l'énergie ($\alpha$) | $\frac{1}{30}$ sr | $10^{-3}$ sr |
| Durée de l'impulsion électromagnétique ($\tau$) | $10^{-6}$ s | $30 \cdot 10^{-9}$ s |
| Puissance de crête de l'impulsion P | 1 MW | 30 MW |
| $\frac{P \cdot \tau}{\alpha^2}$ | 900 J/sr | 900 000 J/sr |

▲ *Tableau IV : comparaison du radar et du lidar.*

système de poursuite automatique d'un mobile utilisant des échos laser [11]; le laser ($\lambda = 6\,943$ Å) émettait des impulsions très énergétiques de 1 joule en 30 nanosecondes, et une partie de cette énergie était réfléchie par la cible, en direction du télescope où elle était détectée. La mesure du temps séparant l'émission de la réception permettait, avec les moyens de l'époque, de définir la distance radiale à quelques mètres près. Sur le *tableau* IV sont comparées les performances d'un radar hertzien et d'un lidar respectivement. Comme dans le cas du radar classique, l'association du lidar et d'un ordinateur (en particulier dans le cas de la poursuite de satellites, en aveugle, de nuit) a augmenté les performances. Le lidar a apporté une solution nouvelle et avantageuse pour déterminer rapidement les données aérologiques au-dessus d'une base de lancement, au moment d'un tir : détermination de la vitesse radiale des nuages, de l'air, caractérisation des turbulences. Des études ont aussi été entreprises sur les possibilités de l'anémométrie interférentielle (lidar Doppler) pour mesurer à distance la vitesse et la direction du vent.

En conclusion, on voit la diversité des applications radar dans le domaine des ondes électromagnétiques et l'essor extraordinaire qu'a connu cette technologie depuis moins d'un demi-siècle. Mis au point essentiellement pour des applications militaires, le radar présente des fonctions réalisables très variées qui permettent de satisfaire de nombreux besoins dans le domaine civil.

## BIBLIOGRAPHIE


(1) CARPENTIER M., *Radars, Concepts nouveaux*, Paris, Dunod, 1966.
(2) DARRICAU J., *Physique et Théorie du radar*, Sodepe, 1973.
(3) CHODAROW M., SUSSKIND C., *Fundamentals of Microwave Electronics*, New York, McGraw Hill.
(4) WATSON M., *Microwave Semiconductors Devices and their Circuit Applications*, New York, McGraw Hill.
(5) ARMAND M., SURYN A., *Oscillateur-mélangeur hyperfréquence et son application aux radars détecteurs d'objets en mouvement*, brevet Th. CSF 4016-7433081.
(6) THOUREL L., *Cours de radar*, ENSAE, 1975.
(7) MONPETIT M., *Radars*, tome I, *Systèmes radars*, ENSTA, 1972.
(8) TSIAMPALIDES M., *l'Ensemble extracteur générateur de plots à Orly*, décembre 1976, service DTXST.
(9) *Electronics*, February 17, 1977, p. 7 E.
(10) WHEATON C. P., *Industrial and Scientific Applications of Doppler Radar*, in *Microwave Journal*, November 1975, vol. 18, n° 11, p. 39.
(11) STARON M., *Étude d'un dispositif de poursuite automatique d'un mobile utilisant des échos laser*, in *la Recherche spatiale*, n° 133, novembre-décembre 1969.


▶ *Page ci-contre, en bas à gauche, figure 19 : composante radiale $V_r$ de la vitesse intervenant dans l'effet Doppler et directement mesurable au sonar (A : bateau porteur du sonar, B : cible). A droite, le poste central d'opérations sonar d'un chasseur de mines montrant les coupoles de visualisation du détecteur et du classificateur de mines.*

## Le sonar

Le sonar, contraction de « sound navigation and ranging » (navigation et télémétrie sonores), est un système qui utilise les propriétés de propagation des ondes acoustiques sous-marines pour la navigation, la détection et les communications en milieu marin.

C'est l'équivalent acoustique et sous-marin du radar. Son importance tient au fait que, contrairement aux ondes électromagnétiques utilisées par ce dernier, les ondes sonores sont peu atténuées dans l'eau et peuvent, dans des conditions favorables, se propager sur des centaines de kilomètres.

### Historique

La naissance et l'évolution du sonar ont été fortement liées à un problème d'ordre militaire : la détection sous-marine. Dès 1915, un ingénieur russe, Constantin Chilowski, proposait un détecteur ultrasonore de sous-marins. Un peu plus tard, Paul Langevin, directeur de l'École de physique et chimie industrielles de la ville de Paris, mettait en évidence pour la première fois un phénomène de propagation ultrasonore à 40 kilohertz. Il fit cette manipulation assisté de MM. Chilowski, Tournier et Holweck au laboratoire d'électricité générale de l'École dans un évier passé à la postérité sous le nom d' « évier de Langevin ». L'émetteur était un transducteur électrostatique appelé condensateur chantant, et le récepteur un pendule de torsion.

L'une des premières applications des ondes sonores sous-marines a été la détermination de la profondeur de la mer. Le principe est simple (*fig.* 17) : une source placée à la surface de l'eau émet un signal court (impulsion) qui est partiellement réfléchi par le fond. Un récepteur permet de mesurer le temps $t$ mis par l'onde pour faire cet aller-retour; la distance parcourue par l'onde sera donc deux fois la hauteur $h$ cherchée. Si on appelle $c$ la vitesse du son dans l'eau ($c$ est voisin de 1 500 mètres par seconde), on peut écrire :

$$h = \frac{ct}{2}$$

De plus, si la longueur d'onde de l'onde émise ($\lambda = \frac{c}{f}$ où $f$ représente la fréquence) est faible devant les dimensions de l'émetteur, l'énergie va se propager principalement dans l'axe du transducteur : ce phénomène, appelé directivité, permet de mesurer précisément la profondeur en utilisant une fréquence élevée; c'est l'intérêt des ultrasons (ondes sonores de fréquences supérieures aux fréquences audibles).

Les premières expériences de propagation ont été faites en 1915 par P. Langevin. En raison du mauvais rendement du dispositif électrostatique, il utilisa à partir de 1917 un quartz piézo-électrique monté entre deux armatures d'acier et fonctionnant à la fois comme émetteur et comme récepteur. Un tel système possède une fréquence de résonance; excité un bref instant par une tension électrique, il se déforme et vibre à cette fréquence. Cette vibration se propage dans l'eau : on a constitué ainsi un émetteur. Comme la plupart des transducteurs, ce système est réciproque : quand l'onde acoustique revient, elle fait entrer le quartz en résonance et une tension électrique apparaît aux bornes du quartz. Il est donc aisé de mesurer le temps mis par l'onde pour revenir. La fréquence de résonance utilisée par Langevin était de l'ordre de 20 kilohertz. En émettant régulièrement des impulsions à partir d'un bateau en déplacement, il pouvait obtenir une courbe précise de la profondeur en fonction de la position.

Ce type de sondeur, qui constitue une forme simplifiée de sonar, est aujourd'hui utilisé en navigation. Il a permis également la détection d'épaves (le *Lusitania*) et la découverte des fosses du Pacifique.

Il est possible, en orientant le système horizontalement, de détecter la présence de navires ou de sous-marins (*fig.* 18) et de connaître leur position. C'est le principe du sonar qui va naître et se développer rapidement en raison des besoins militaires : en 1916, une mission « Langevin-Colin » se constitue; elle va permettre la mise au point et les tests de dispositifs de détection de sous-marins (détection jusqu'à 1 300 m de distance en

mai 1918 à Toulon). Devant les résultats obtenus, ces appareils seront installés sur des bâtiments de guerre et ne cesseront de se développer parallèlement à des systèmes de communication sous-marine et de recherche de mines.

La bataille de l'Atlantique a montré que l'utilisation des propriétés de propagation des ondes sonores était un moyen décisif pour la détection des mines et des sous-marins. Les progrès de ces derniers (sous-marins atomiques rapides et à longue durée d'immersion) font qu'une part importante du budget des Marines nationales est consacrée à l'étude et à la fabrication de systèmes sonar de plus en plus performants.

Il existe un grand nombre de types de sonars ; on peut distinguer les sonars actifs qui émettent de l'énergie acoustique, laquelle est réfléchie par tout objet situé dans le champ sonore, puis reçue par une antenne de réception et détectée, des sonars passifs qui n'émettent rien mais écoutent les rayonnements émis volontairement ou non par les navires ou les sous-marins.

## Sonar actif

### Fonctionnement

Un sonar actif fonctionne de la même façon que le sondeur ultrasonore déjà décrit, mais il est plus complexe, car, au lieu de déterminer une profondeur d'eau, on cherche à connaître la direction (appelée gisement si elle est repérée par rapport au bateau porteur, ou azimut par rapport au nord géographique), la distance, éventuellement la profondeur (ou site) s'il s'agit d'un sous-marin, la vitesse et l'itinéraire du bâtiment.

La **direction** peut être obtenue en utilisant un ensemble émetteur-récepteur directif orientable : le sonar est alors dit directif. Pour éviter d'avoir une partie mobile, on peut en disposer dans un nombre de directions suffisant. L'inconvénient de ces procédés est qu'ils obligent à sonder successivement toutes les directions pour explorer l'horizon. Une méthode de plus en plus employée, et qui sera décrite plus loin, est la formation de voies ; elle nécessite un grand nombre d'hydrophones (récepteurs sous-marins analogues aux microphones dans l'air) orientés dans toutes les directions et un traitement électronique des signaux issus de ces capteurs. Un tel sonar, qui peut sonder simultanément toutes les directions, est dit panoramique.

Comme pour le sondeur ultrasonore, la **distance** est mesurée grâce au retard entre l'émission et le retour de l'écho.

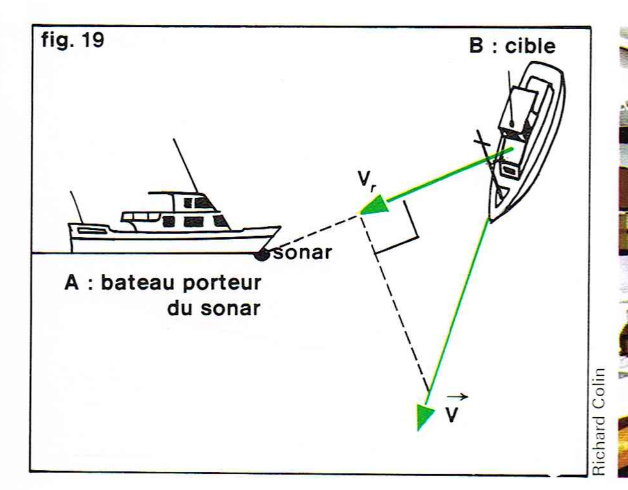
La **vitesse relative** de la cible (*fig.* 19) par rapport au bâtiment porteur est déterminée grâce à un décalage en fréquence causé par ce mouvement et appelé effet Doppler : si le bateau A porteur du sonar est fixe et si la cible B se rapproche avec une vitesse dont la composante dans l'axe des deux bateaux est $V_r$ (voir *fig.* 20), un signal émis au temps $t = 0$ en A sera reçu en B au temps :



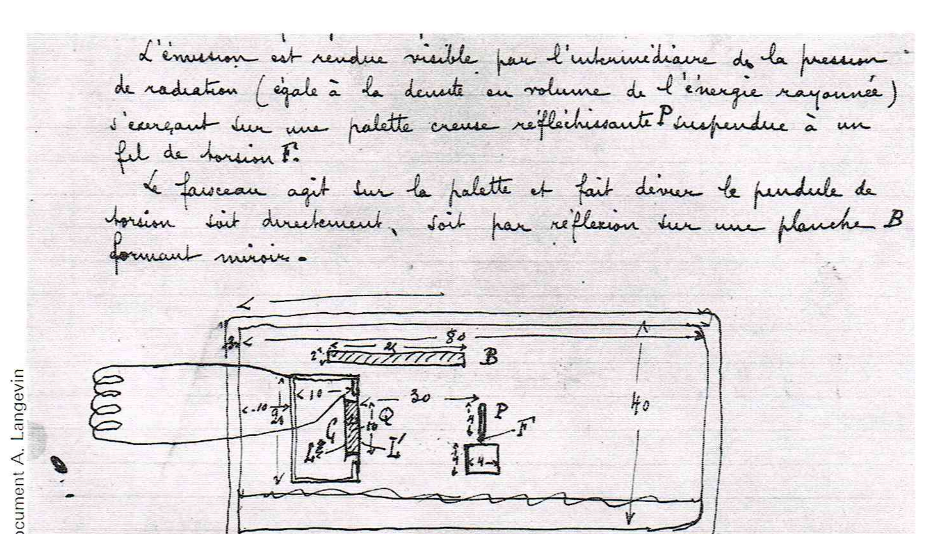
$$t_1 = \frac{AB_1}{c}$$

soit

$$t_1 = \frac{l - V_r t_1}{c}$$




Richard Colin

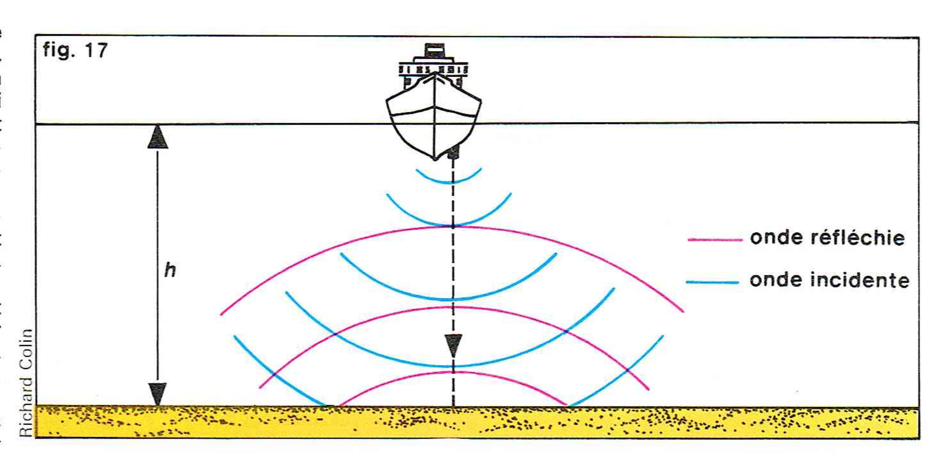


L'émission est rendue visible par l'intermédiaire de la pression de radiation (égale à la densité en volume de l'énergie rayonnée) s'exerçant sur une palette creuse réfléchissante P suspendue à un fil de torsion F.

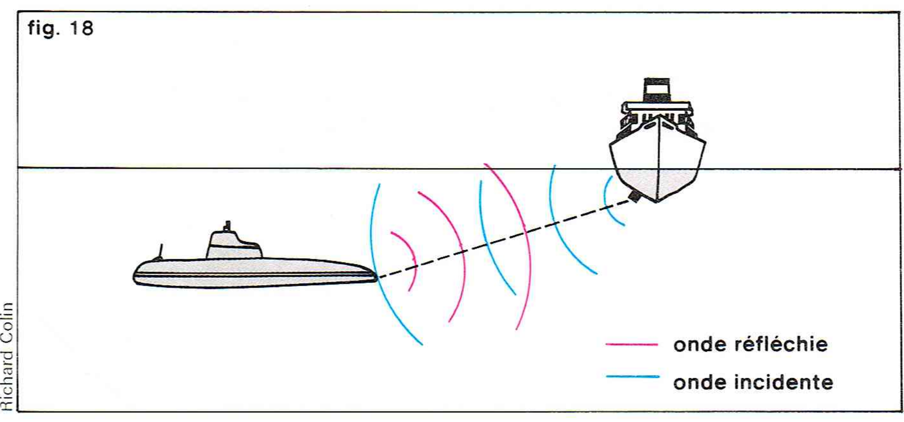
Le faisceau agit sur la palette et fait dévier le pendule de torsion soit directement, soit par réflexion sur une planche B formant miroir.



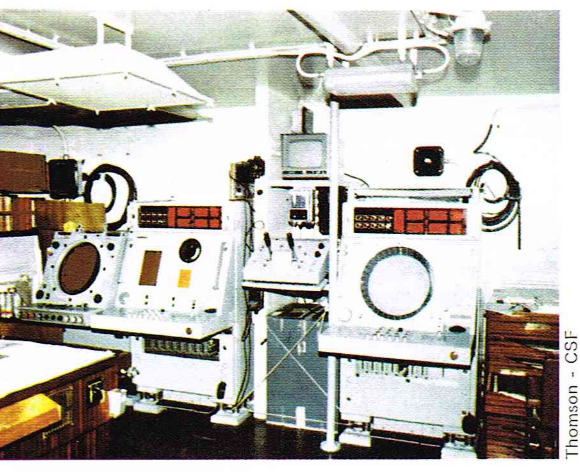
Document A. Langevin




Richard Colin



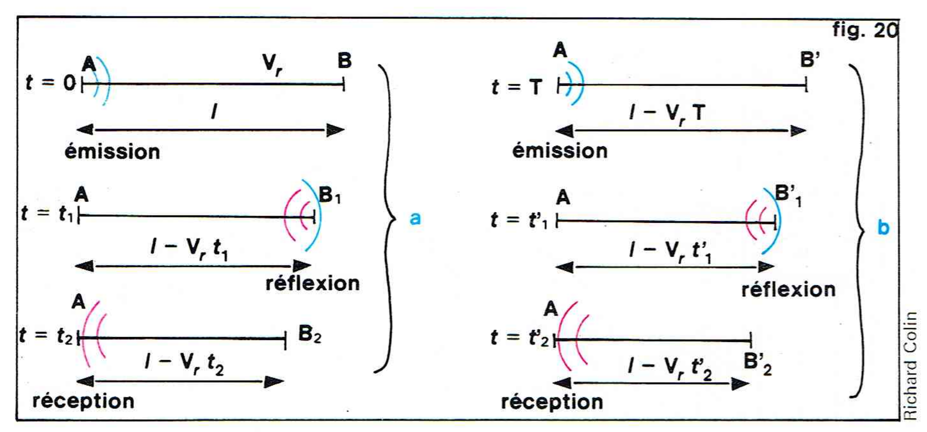

Richard Colin



Thomson - CSF

*En haut, manuscrit de Paul Langevin relatif à la première mise en évidence de propagation dans l'eau des ultrasons, faite en 1915.*

▲ *Figure 17 : mesure de la profondeur des mers à l'aide d'un sondeur ultrasonore. Figure 18 : principe du premier sonar fonctionnant de la même façon que les sondeurs ultrasonores ; il permet de détecter la présence de navires et de sous-marins et de connaître leur position.*




*▲ Figure 20 : trajets parcourus par l'onde sonore émise au temps $t = 0$ (en a) et au temps $t = T$ (en b).*
*▼ Figure 21 : diagramme de fonctionnement d'un sonar actif moderne.*
*Figure 22 : diagrammes de directivité en émission pour les sonars ; a, émission panoramique : elle est simultanée sur tous les hydrophones ; b, émission directive ; toute la puissance de l'émission est concentrée sur un seul secteur ; c, émission T. F. T.*

donc $$t_1 = \frac{l}{c + V_r}$$

L'écho, qui se comporte comme un signal émis de $B_1$ par la cible au temps $t = t_1$, parviendra donc en A au temps $t_2 = 2\, t_1$

soit $$t_2 = \frac{2l}{c + V_r}$$

Si le signal est périodique $\left(\text{fréquence } f, \text{ période } T = \frac{1}{f}\right)$, l'onde émise au temps $t = T$ parviendra en B au temps :

$$t'_1 = T + \frac{AB'_1}{c}$$

soit $$t'_1 = T + \frac{l - V_r t'_1}{c}$$

d'où $$t'_1 = \frac{cT + l}{c + V_r}$$

La durée du trajet total $(t'_2 - T)$ sera donc égale à :

$$2\,(t'_1 - T)$$

d'où $$t'_2 = 2\, t'_1 - T$$

soit $$t'_2 = \frac{2\,l + T\,(c - V_r)}{c + V_r}$$

La période de l'onde reçue est :

$$T' = t'_2 - t_2$$

soit $$T' = \frac{c - V_r}{c + V_r}$$

La fréquence $f'$ reçue est donc :

$$f' = f\,\frac{c + V_r}{c - V_r}$$

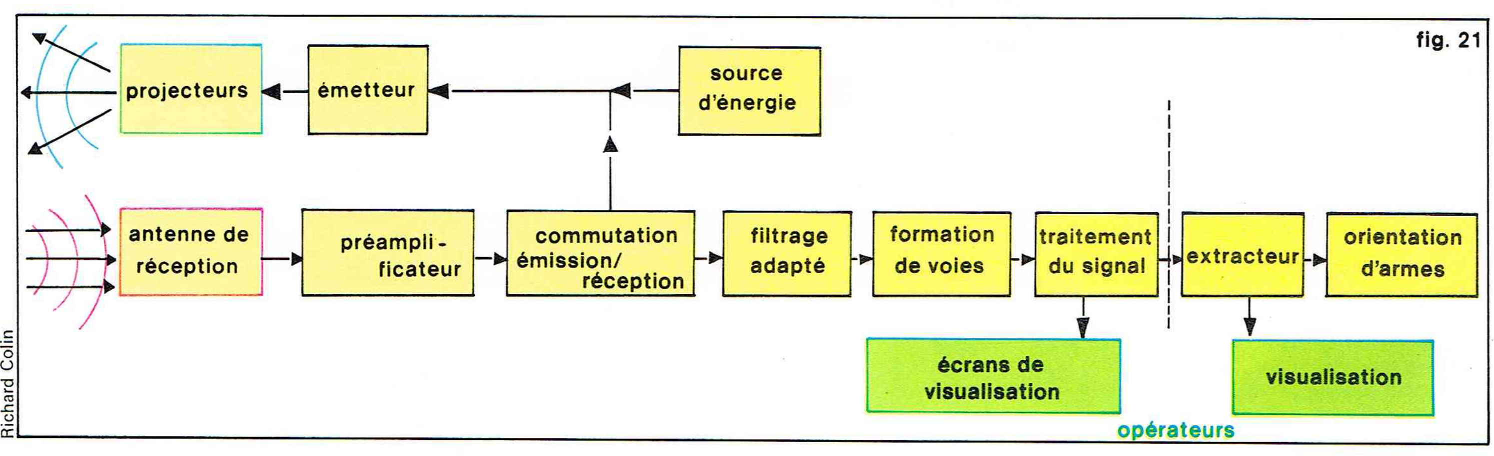
Elle est plus élevée que la fréquence d'émission.
Si la cible s'éloigne, on trouve de même :

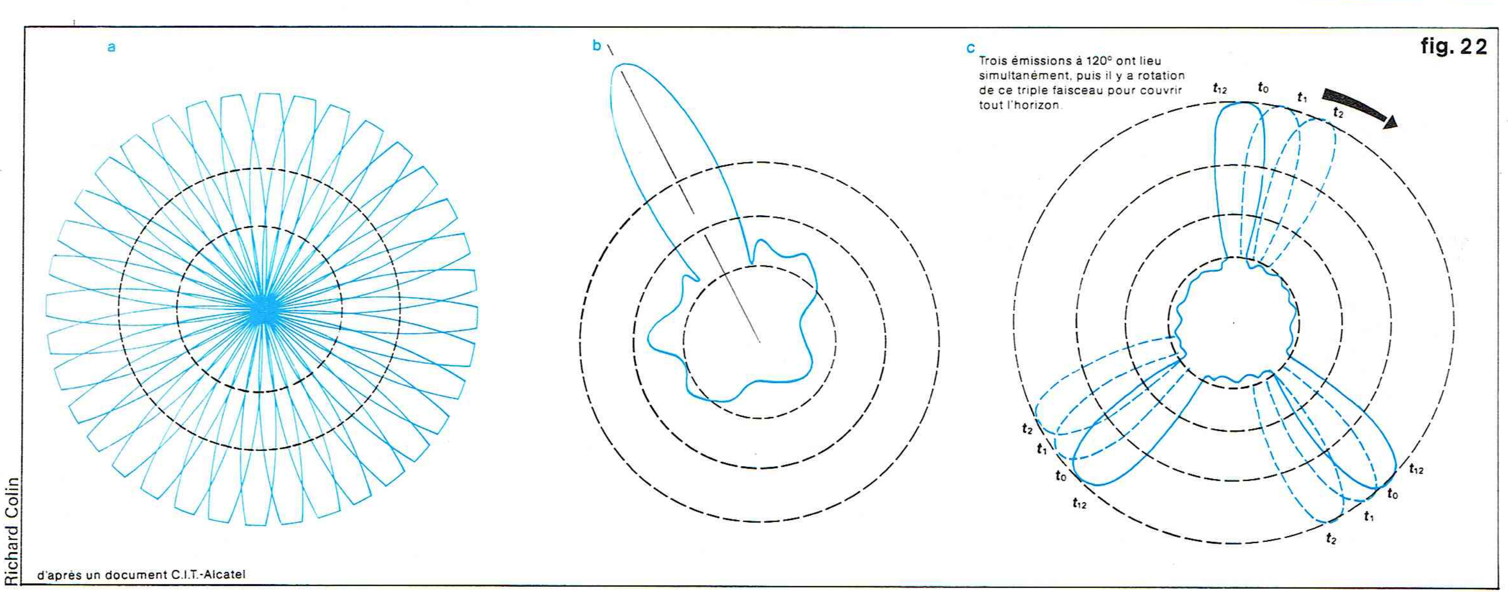
$$f' = f\,\frac{c - V_r}{c + V_r}$$

La fréquence est alors plus basse que celle de l'émission.

On montre que ces formules restent vraies même lorsque les deux bâtiments se déplacent. La mesure de cette variation de fréquence permet donc de déterminer facilement la vitesse relative. Un phénomène analogue se produit lorsqu'on écoute des voitures sur le bord d'une route : le son est plus aigu lorsqu'un véhicule s'approche, et il devient plus grave après son passage.

Enfin, on peut déterminer la **vitesse absolue** ainsi que l'**itinéraire** du bâtiment en utilisant les indications obtenues après plusieurs échos successifs.



### Description

Un système sonar actif moderne équipant un bâtiment de guerre est un ensemble très important dont les principaux éléments sont représentés sur la *figure* 21.

L'**émetteur** est un étage de puissance amplifiant le signal à émettre et alimentant les *projecteurs* qui transforment l'énergie électrique en énergie acoustique (système analogue au haut-parleur dans l'air). La base d'émission d'un sonar panoramique est un cylindre de plusieurs mètres de diamètre sur lequel les transducteurs sont disposés en colonne. En émission, un tel sonar peut fonctionner de plusieurs façons suivant la puissance qu'il est nécessaire d'envoyer dans chaque voie (voir *fig*. 22).

Le transducteur lui-même est généralement du type magnétostrictif et électrostrictif. La partie active est constituée d'un ensemble de céramiques ferro-électriques alimentées électriquement en parallèle.

Cet ensemble vibre en demi-onde et une contremasse permet de régler la bande passante du projecteur. L'adaptation d'impédance avec l'eau est réalisée grâce à un pavillon, et l'ensemble est placé dans un boîtier étanche, le pavillon seul restant en contact avec l'eau.

Pour obtenir une puissance d'émission suffisante, des éléments analogues sont regroupés sur une base d'émission. L'ensemble peut contenir quelques centaines de projecteurs et peser plusieurs tonnes.

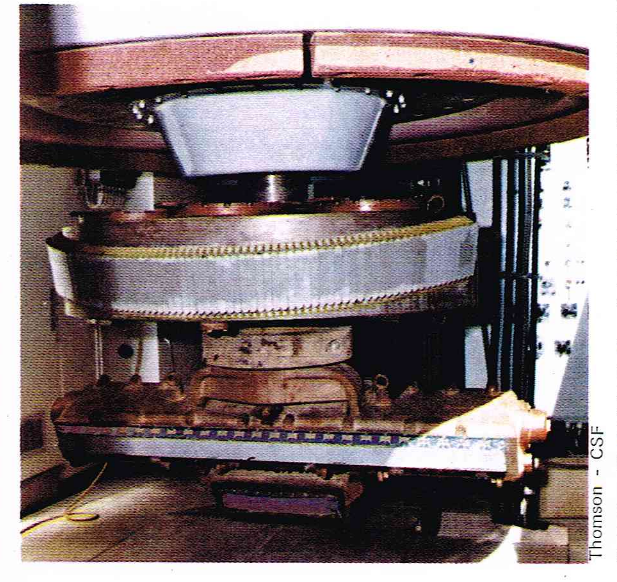
Enfin, les transducteurs sont montés dans des dômes de protection permettant en outre un carénage et une réduction de la traînée et des bruits d'écoulement.

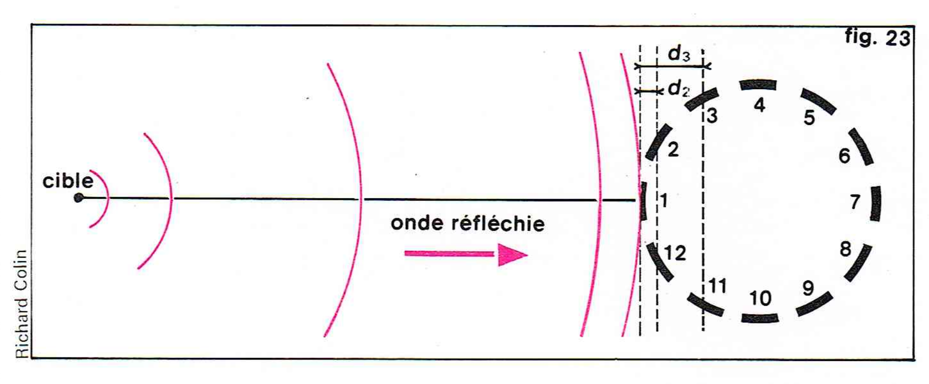
Un **système d'alimentation** permet de fournir des puissances atteignant quelques centaines de kilowatts pendant l'émission; il s'agit de batteries tampon ou plus souvent de groupes tournants à volant d'inertie.

Une **antenne de réception** composée d'un grand nombre d'hydrophones (quelques centaines) est disposée pour permettre de reconnaître la provenance (gisement et parfois site) de l'écho. Pour des raisons d'encombrement et de commodité, cette antenne est généralement confondue avec la base d'émission, les mêmes éléments pouvant fonctionner tour à tour comme projecteurs puis comme hydrophones en raison de propriétés de réciprocité des transducteurs. Dans certains cas, il peut être cependant intéressant de les séparer pour diversifier les choix possibles de dimension d'antenne.

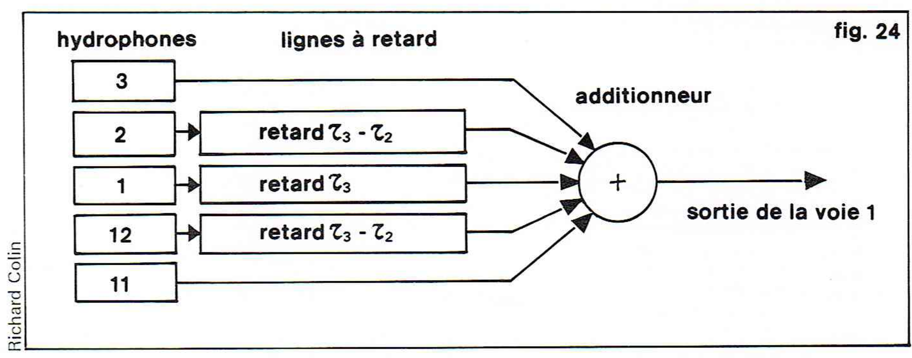
Cette antenne est disposée à l'avant du bâtiment, car c'est la zone la moins bruyante. Sur les gros navires, elle est disposée dans un bulbe d'étrave. Ces antennes sont stabilisées par une suspension au roulis et même au tangage pour éviter de voir se dégrader leurs performances de directivité.

Une **préamplification** des signaux issus des hydrophones est nécessaire. Elle permet d'abaisser considérablement leur impédance de sortie à l'aide de transistors à effet de champs.


Thomson - CSF



Richard Colin



Richard Colin

▲ *Figure 23 : antenne de réception d'un sonar; les hydrophones n° 2 et n° 3 recevront un signal qui aura parcouru une distance supérieure respectivement de $d_2$ et de $d_3$ par rapport au signal reçu par l'hydrophone n° 1. Figure 24 : principe de la formation d'une voie.*

Un **filtrage adapté,** centré sur la fréquence d'émission, est destiné à réduire les bruits de provenances diverses (bruit marin, bruit électronique, etc.) pour ne garder que le signal utile.

Un étage appelé **formation de voies** permet de déterminer la direction de la source des échos réfléchis.

Quand un écho parvient sur une antenne cylindrique, les hydrophones sont excités les uns après les autres (*fig*. 23). Si l'écho renvoyé par une cible située dans l'axe de l'hydrophone numéro 1 y parvient au temps $t = 0$, il parviendra sur les hydrophones numéros 2 et 12 avec un retard :

$$\tau_2 = \frac{d_2}{c}$$

sur les hydrophones numéros 3 et 11 avec un retard :

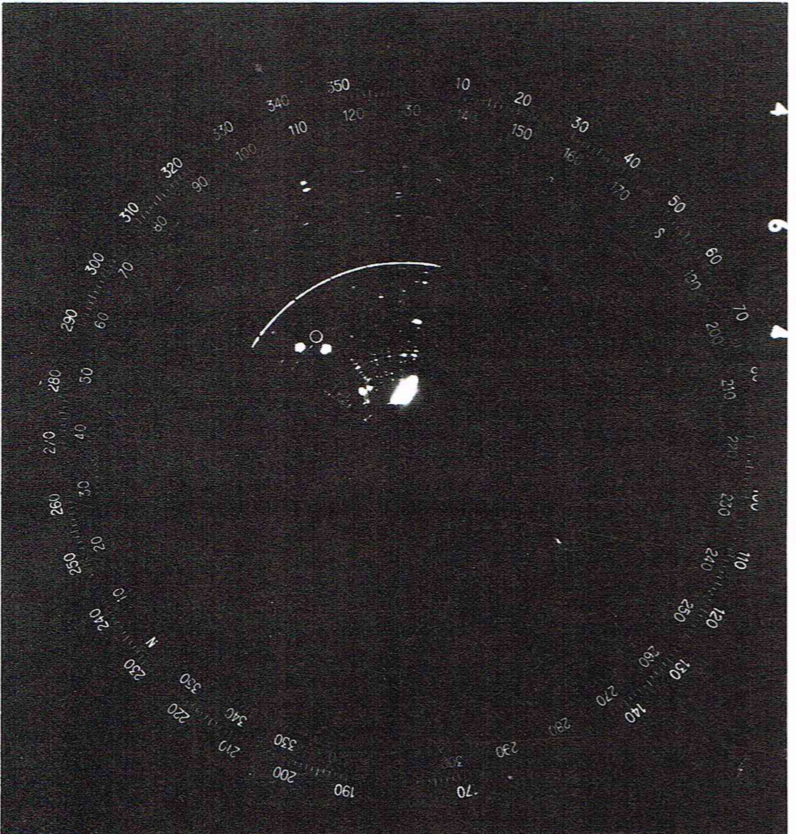
$$\tau_3 = \frac{d_3}{c}, \text{ etc.}$$

Former une voie, c'est retarder électroniquement (de façon analogique ou, actuellement, de façon digitale à l'aide de registres à décalage) le signal issu de la voie 1 d'un temps $\tau_3$ et des voies 2 et 12 d'un temps $\tau_3 - \tau_2$, puis faire la somme des signaux obtenus (*fig*. 24).

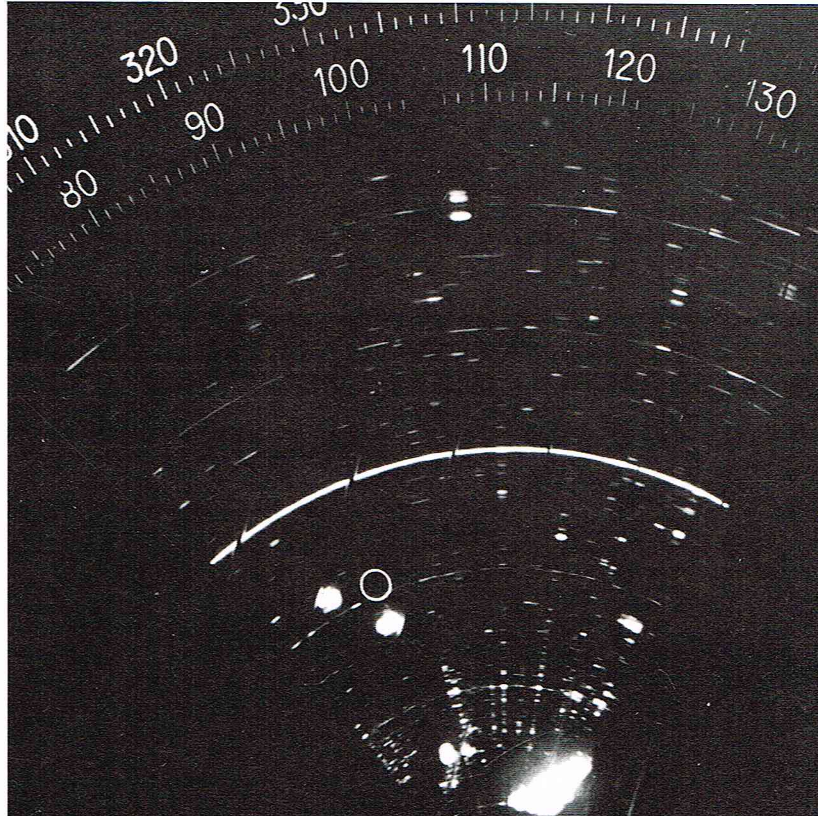
Ainsi, tous les signaux obtenus après retard sont en phase et s'ajoutent pour accroître l'amplitude du signal provenant de cette direction au détriment des signaux d'origine différente. En répétant ce montage pour toutes les voies, on obtient une réception panoramique à voies préformées. On peut également, pour réduire l'ensemble, faire tourner rapidement par commutation électronique un seul ensemble de lignes à retard : c'est la réception panorâmique à « scanning ». Une valeur usuelle de nombre de voies est 36, chacune couvrant 10 degrés. Sur certains sonars, on peut atteindre plusieurs centaines de voies. Le système de voies préformées est implanté sur tous les sonars importants et permet d'obtenir à la fois une bonne directivité et une visualisation simultanée de toutes les voies.

Le **traitement du signal** est un étage électronique qui permet d'obtenir les informations cherchées; la façon la plus simple est de détecter puis d'intégrer le signal obtenu à la sortie des voies. Actuellement, le traitement cohérent, qui permet des gains considérables de performances, est largement utilisé. Ces traitements fournissent une estimation des paramètres recherchés (existence d'un écho, direction, distance, vitesse) qui ne doit pas être tributaire de phénomènes sans rapport avec ceux-ci (bruit, notamment réverbération dont l'origine sera décrite plus loin). On montre en particulier qu'en

◀ *Les bases d'émission-réception du sonar détecteur (circulaire, en haut) et classificateur (rectangulaire, en bas) d'un chasseur de mines. Cet ensemble, muni d'un système de stabilisation antiroulis et antitangage, est ici en position de maintenance dans le bateau; il est immergé lors de son utilisation.*



Thomson - CSF




Thomson - CSF

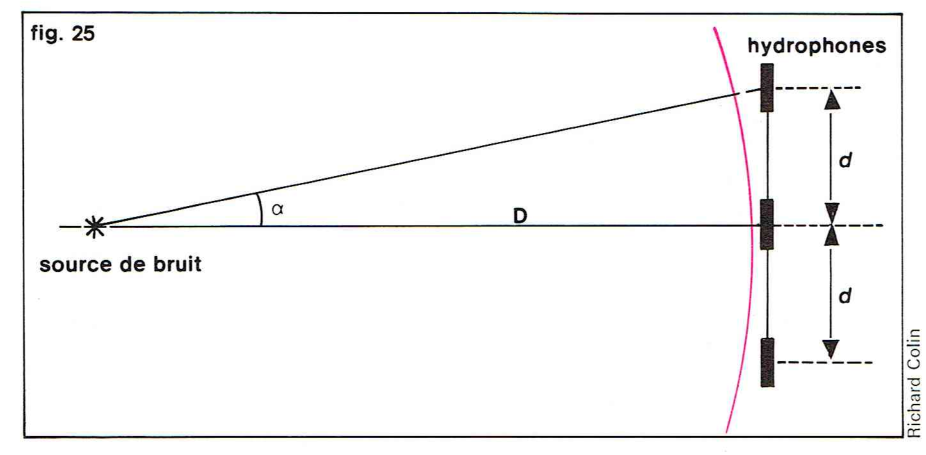
▲ *Deux vues de l'écran de visualisation d'un sonar-détecteur d'un chasseur de mines : à gauche, l'écran entier; à droite, grossissement du champ balayé (= 30° par rapport à la direction moyenne); le repérage de l'écho de la mine est réalisé par le marqueur circulaire.*

émettant dans une bande de fréquence de largeur B, pendant une durée T, le rapport signal sur bruit est multiplié par un gain théorique égal à BT par rapport à une émission à fréquence fixe.

Un **écran de visualisation**, constitué par un tube cathodique circulaire appelé tube PPI (Plan Position Indicator), donne une représentation géographique (direction et distance) des échos; leur amplitude est traduite grâce à une modulation de la brillance. Le balayage se fait après chaque émission sous forme d'une circonférence de diamètre croissant avec le temps et s'illuminant sur chaque écho. Le tube utilise des phosphores à forte rémanence pour maintenir assez longtemps la visualisation. Un autre écran appelé loupe permet, après avoir localisé un écho, de le pointer avec un plus fort agrandissement pour avoir le maximum de précision sur la cible.

Pour réduire la complexité de la surveillance d'un tel écran, les sonars les plus sophistiqués possèdent un **extracteur** qui, par comparaison entre les balayages successifs, permet de ne retenir que les points intéressants et de les projeter sur un autre écran de visualisation. Un dispositif de poursuite permet de s'assurer de la persistance et de la cohérence de ces échos; un calculateur détermine avec précision position, itinéraire et vitesse réelle de la cible. Ces résultats sont présentés à l'opérateur. L'extracteur peut également commander un système d'orientation d'armes.

▼ *Figure 25 : principe du télémètre acoustique passif.*




Richard Colin

Un système sonar actif moderne est un ensemble très volumineux, complexe et cher. Sur un bâtiment de surface, il peut y avoir un sonar de coque et un sonar remorqué, permettant d'émettre et de recevoir des échos jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Il existe de nombreux autres types de sonars actifs :

— sonar pour sous-marins;

— sonar de torpilles;

— sonar de chasse aux mines, qui équipe les dragueurs de mines;

— sonar pour hélicoptères : l'hélicoptère mouille le sonar qui lui est relié par un câble, émet, écoute et repart. Il peut ainsi couvrir rapidement une grande surface. Il est utile pour la détection des sous-marins;

— bouée sonar, larguée par avion ou mise en place par un bâtiment. Elle enregistre ou émet les informations qu'elle peut obtenir;

— sonar fixe pour la surveillance;

— sonar de navigation : il permet de déterminer la présence d'obstacles (récifs, hauts-fonds, glace) ou, en utilisant l'effet Doppler sur le fond ou en réverbération de volume dans l'eau, de connaître la vitesse et la distance parcourue par le bateau.

## *Sonar passif*

C'est un autre type de sonar, qui n'émet pas afin d'éviter de se faire repérer. Pour cette raison, il est très utilisé dans les sous-marins. Ce dispositif écoute tous les bruits de la mer pour déceler la présence de bâtiments. La plupart des systèmes sonar actif modernes peuvent fonctionner en passif. L'écoute se fait en large bande pour capter toutes les vibrations des navires : arbres d'hélice, moteurs, traînée, cavitation (bulles de vapeur formées dans l'eau lorsque la pression hydrostatique devient inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau; ce phénomène se produit en particulier autour des hélices, et l'implosion de ces bulles produit un bruit caractéristique). On détermine ainsi la présence et la direction d'un rayonnement anormal (sonar de veille passive). Il est difficile de connaître la distance; elle peut être estimée par triangulation entre différents hydro-

phones ou par différence de temps de réception entre rayons ayant suivi des chemins différents; ce dernier point suppose une connaissance précise des conditions de propagation (courbe de bathycélérimétrie qui représente l'évolution de la vitesse de propagation des ondes acoustiques en fonction de la profondeur et dont l'importance sera signalée plus loin).

La distance peut aussi être calculée en déterminant la courbure de l'onde incidente : c'est le télémètre acoustique passif (*fig.* 25). Trois récepteurs distants de $d$ reçoivent le signal avec un décalage de durée $\tau$. L'angle $\alpha$ étant toujours petit, on peut écrire :

$$\alpha = \frac{d}{D} = \frac{\tau c}{d}$$

La distance D est donc :

$$D = \frac{d^2}{\tau c}$$

On évite de pointer exactement la source, en introduisant des lignes à retard compensant les différences de marche dues à l'inclinaison des rayons par rapport au plan des récepteurs.

Enfin, certains sonars appelés intercepteurs permettent la détection rapide et sûre ainsi que la mesure des paramètres des émissions sonar adverses (émission de torpilles, identification de bateaux).

## Influence des conditions de propagation

La propagation d'une onde sonore est régie par l'équation de D'Alembert, qui relie le déplacement $u$ d'un point lié au milieu à sa position et au temps, et s'écrit :

$$\Delta u - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

### Vitesse du son

On montre que $c$ représente la vitesse de propagation de l'onde et vaut :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi}}$$

où $\rho$ est la masse volumique du milieu et $\chi$ son coefficient de compressibilité.

La vitesse du son dans l'eau de mer peut varier entre 1 450 et 1 560 mètres par seconde; elle dépend de la température $t$ (en degrés Celsius), de la pression due à la profondeur $h$ (en mètres) et de la salinité $s$ (en °/₀₀), selon la loi approchée :

$$c \text{ (en m/s)} = 1\,450 + 4{,}61\, t - 0{,}045\, t^2 + 0{,}018\,2\, h + 1{,}3\, (s - 34)$$

En surface, pour une salinité de 34 °/₀₀ et à 10 °C, on obtient $c = 1\,492$ m/s.

La salinité est généralement uniforme et, à un instant donné, la température dépend principalement de la profondeur; cela revient à dire que la vitesse du son $c$ ne dépend que de l'abscisse verticale. Au cours du temps, les variations saisonnières de température en surface modifient le profil de célérité (bathycélérimétrie). On peut voir un exemple sur la *figure* 26.

### Trajet des rayons sonores

L'allure de la bathycélérimétrie influe considérablement sur les conditions de propagation. Si $c_0$ et $\theta_0$ représentent la vitesse du son et l'angle d'un rayon sonore avec l'horizontale à l'émission (*fig.* 27), $c$ et $\theta$ en un point quelconque du rayon sont liés par la loi de Descartes :

$$\frac{c}{\cos\theta} = \frac{c_0}{\cos\theta_0}$$

On peut, en connaissant $c$ ($z$), déterminer les trajectoires des rayons sonores en résolvant l'équation :

$$x = \int_{z0}^{z} \frac{c\,(z)}{\sqrt{\frac{c_0^2}{\cos^2\theta_0} - c^2\,(z)}}\,dz$$

La zone insonifiée par un sonar dépend fortement de la profondeur d'émission. A partir d'une certaine profondeur appelée *immersion critique* (la vitesse du son y est égale à celle en surface), il n'y a plus de zone d'ombre. Cela explique pourquoi, outre un sonar de coque, les bâtiments sont souvent équipés d'un sonar remorqué : cela permet d'accroître considérablement la partie insonifiée en l'immergeant de quelques centaines de mètres. Il n'est pas possible actuellement d'atteindre l'immersion critique (500 à 4 000 mètres), en raison des grosses difficultés soulevées par la fabrication et le remorquage d'un sonar de plusieurs tonnes à grande profondeur.

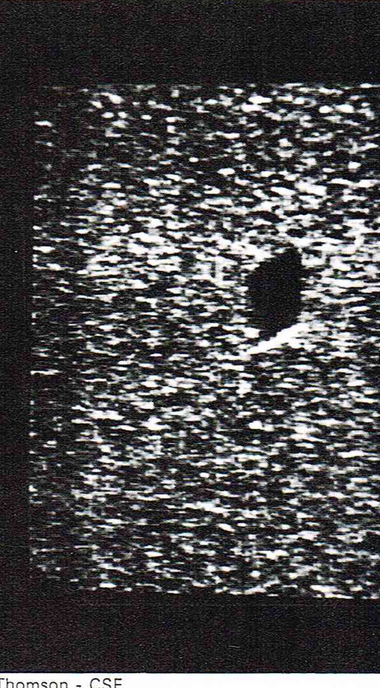
Par petits fonds, les réflexions sur le fond et la surface créent un régime d'ondes stationnaires et un phénomène de dispersion (la vitesse du son dépend de la fréquence) qui compliquent considérablement les calculs de champ sonore. Ce dernier est alors la somme de termes correspondant à des modes discrets de propagation; en particulier, selon les directions, certaines fréquences ne peuvent pas se propager (interférences destructrices) ou sont renforcées (interférences constructrices). Des calculs précis, tenant compte du coefficient de réflexion de fond et de variations de profondeur, ne sont possibles qu'avec l'aide de calculateurs.

### Bruit

Les performances d'un sonar peuvent être très affectées par la présence de bruit; ce dernier peut être défini comme un signal aléatoire qui vient s'ajouter au signal utile et le rend ainsi moins facile, voire impossible à identifier. Il limite à la fois la portée et la cadence des informations de tout appareil de détection. Ce bruit a des origines très diverses :

— *Bruit ambiant marin* qui provient des bulles et embruns dus au vent, de la pluie, du trafic maritime, des phénomènes biologiques, du bruit thermique. Le niveau de ce bruit peut très fortement varier, et le système sonar doit pouvoir s'y adapter pour utiliser au mieux ses performances.

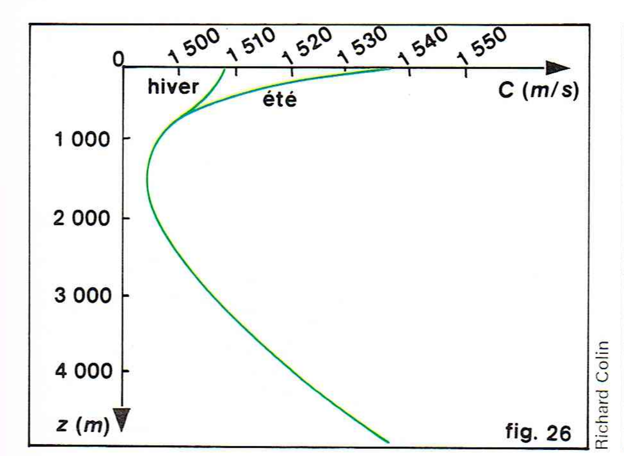
— *Bruit d'origine électrique* : tous les étages d'amplification et de traitement du signal introduisent du bruit sous forme de tensions ou de courants aléatoires ajoutés aux signaux reçus par les hydrophones. Moyennant quelques précautions (hydrophones sensibles, préamplificateurs à faible bruit), on peut faire en sorte que cette

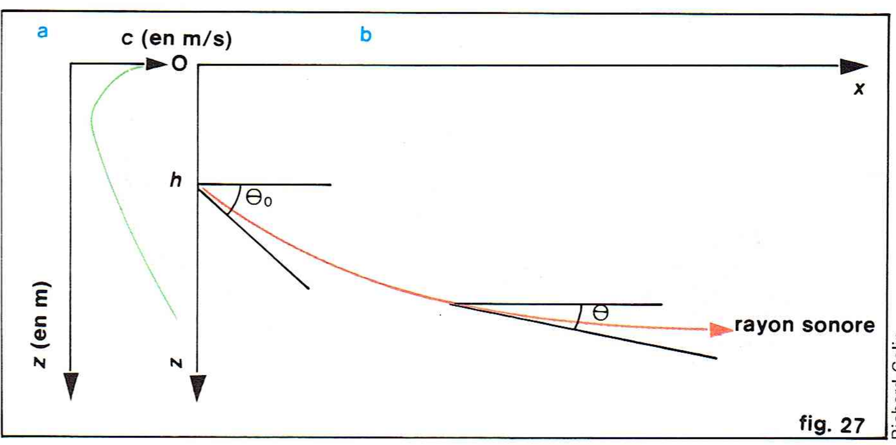


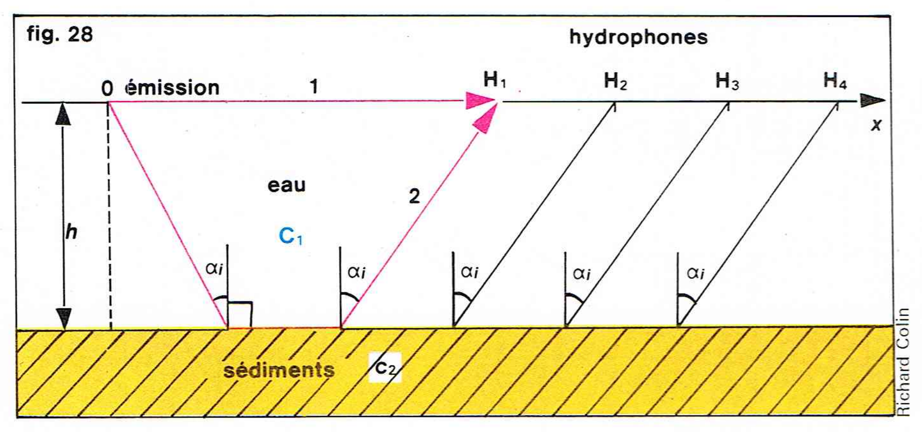
Thomson - CSF

▲ ***Image obtenue sur l'écran loupe d'un sonar; la mémoire loupe permet de grossir une zone intéressante repérée sur l'écran de visualisation et de garder l'image durant environ 15 mn.***

▼ ***Figure 26 : profil de la vitesse du son dans l'océan Atlantique. Figure 27 : variation de l'inclinaison des rayons sonores*** (b) ***avec la vitesse du son*** (a).






▲ *Figure 28 : principe de la sismique réfraction; l'onde qui a pénétré dans les sédiments sous l'angle critique $\alpha_i$ en ressort en tout point sous cet angle. Les hydrophones reçoivent deux échos : le premier a suivi le chemin 1 à la vitesse $c_1$, l'autre, le chemin 2 à la vitesse $c_2$. Les différences de temps de réception permettent de connaître $c_1$, $c_2$ et h.*

perturbation soit négligeable devant le bruit ambiant marin.

— *Bruit du porteur :* les récepteurs doivent être placés au point le moins bruyant du navire (en général à l'avant) et découplés de ce dernier à l'aide de suspensions. D'autre part, toutes les machines bruyantes doivent être éloignées et amorties.

— *Bruit de réverbération.* Ce bruit est lié au signal émis : les bulles, les particules en suspension, les poissons diffusent l'onde émise et la renvoient partiellement sur le récepteur. C'est la réverbération de volume. Il en est de même sur le fond et la surface (réverbération de surface).

On peut limiter l'influence de certains de ces bruits (bruit ambiant, électronique, bruit du porteur) en émettant un signal très puissant. Malheureusement, on reste limité par la cavitation qui se produit aux fortes pressions sonores. D'autre part, le bruit de réverbération augmente en même temps que le niveau d'émission. Seul un traitement approprié du signal (traitement cohérent par exemple) peut alors permettre de séparer le signal de la réverbération.

### *Fréquence d'émission*

Pour obtenir une directivité convenable, il est nécessaire que l'antenne soit grande devant la longueur d'onde émise, donc que la fréquence soit élevée. Malheureusement, l'absorption de l'eau et la réverbération croissent rapidement avec la fréquence et limitent alors la portée de l'ensemble. Le choix de la fréquence d'émission dépend donc de la portée nécessaire et varie entre quelques kilohertz et quelques dizaines de kilohertz.

## *Autres applications*

Un nombre important de dispositifs sous-marins fonctionnent de la même façon que le sonar :

**Célérimètre.** Il détermine la vitesse du son en fonction du temps de parcours entre deux transducteurs.

**Sondeurs ultrasonores.** Analogues aux dispositifs de Langevin, ils peuvent mesurer les plus grandes profondeurs océaniques avec une précision de quelques mètres grâce à des pinceaux d'émission très étroits et une détermination précise de la vitesse du son et du temps de parcours.

**Prospection géologique et pétrolière.** Le sous-sol marin est formé de couches dont on désire connaître l'épaisseur et la vitesse de propagation du son afin de les identifier. Pour cela, un bateau émet des ondes de choc : source explosive, sparker, boomer, canons à vapeur, etc. Si $c_1$ et $c_2$ sont les vitesses du son dans l'eau et dans la première couche sédimentaire ($c_2$ est supérieure à $c_1$), l'onde de choc émise, qui a pour incidence l'angle limite $\alpha_i$ tel que :

$$\sin \alpha_i = \frac{c_1}{c_2}$$

subit une réflexion totale (sismique réfraction). En fait, l'onde réfractée se propage dans la couche de sédiment et en ressort en chaque point sous l'angle critique $\alpha_i$. Des hydrophones sont disposés selon la *figure* 28; ils reçoivent deux échos : l'onde directe (trajet 1) et l'onde réfléchie (trajet 2). Les temps de propagation sont respectivement :

$$t_1 = \frac{x}{c_1}$$

$$t_2 = \frac{x - 2\,h \sin \alpha_i}{c_2} + \frac{2\,h \cos \alpha_i}{c_1}$$

Le tracé de la courbe dromosomique ($t_1$ et $t_2$ en fonction de $x$) permet de connaître $c_1$ et $c_2$ en mesurant la pente des deux droites (*fig.* 29).

On peut généraliser ce procédé à l'étude de plusieurs couches, à un fond incliné, etc.

**Navigation Doppler.**

**Balises acoustiques** de navigation (répondeurs pour sous-marins leur permettant de connaître leur position).

**Sonar portable pour plongeur.**

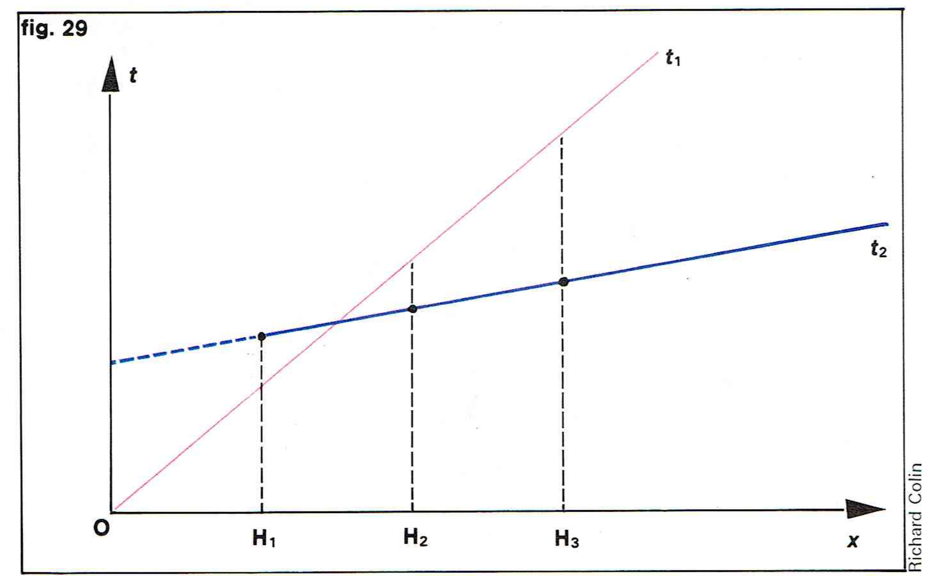
**Systèmes de télécommunication acoustique.**

## *Conclusion*

Un système sonar est un ensemble volumineux d'appareillages de nature très différente : acoustique, électronique de pointe, théorie de l'information, transducteur de puissance, mécanique, etc. Ses performances doivent s'adapter aux variations des paramètres du milieu. Les améliorations qui peuvent lui être apportées sont l'objet de nombreuses recherches, principalement financées par les militaires : étude de la propagation en milieu marin, traitement de plus en plus sophistiqué du signal, mécanique complexe pour l'immersion plus grande des sonars remorqués. Ses applications civiles sont surtout la navigation et la recherche pétrolière en mer.

Des recherches sont également menées sur des sonars biologiques : certains animaux (chauves-souris, dauphins) possèdent un système d'émission et de réception acoustiques tout à fait analogue au sonar, qui leur permet de se diriger ou d'atteindre leurs proies dans de très mauvaises conditions de visibilité (la nuit par exemple) : la nature a mis au point au cours des siècles des dispositifs de faible encombrement et à hautes performances, bien adaptés à la localisation et à la poursuite, et dont l'homme a tout intérêt à s'inspirer !

▼ *Figure 29 : courbe dromosomique; c'est le relevé des retards $t_1$ et $t_2$ mis par les échos pour arriver sur les hydrophones lors de la sismique réfraction. Les vitesses de propagation $c_1$ et $c_2$ sont les inverses des pentes respectives de ces deux droites.*




## BIBLIOGRAPHIE

ALBERS V. M., *Underwater Acoustics*, New York, Plenum Press. - GUIEYSSE L., SABATHE P., *Acoustique sous-marine*, Paris, Dunod. - HORTON J. W., *Fundamentals of Sonar*, Annapolis, US Naval Inst. - LUCAS R., *Acoustique*, Paris, éd. Claude Bernard. - MASON W. P., *Physical Acoustics*, New York, Van Nostrand. - PASTEAU H., *Théorie et Applications de l'acoustique sous-marine*, Paris, ENSTA. - SABINE W. C., *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press. - STEPHENS R. W. B. S., BATES A. E., *Acoustics and Vibrational Physics*, London, Edward Arnold Publishers Ltd.

## La détection par les rayons X

Les rayons X furent découverts en 1895 par Rœntgen qui reçut le prix Nobel en 1901 pour avoir mis en évidence ce rayonnement inconnu — d'où l'appellation de « X » — qui avait la propriété de traverser les corps opaques. La nature des rayons X est identique à celle des ondes lumineuses dont ils ne diffèrent que par la longueur d'onde. La preuve expérimentale de leur nature d'onde électromagnétique n'a été obtenue qu'en 1912, à la suite des travaux de von Laue sur leur diffraction par les atomes d'un cristal.

Les travaux théoriques de Moseley, le spectrographe à cristal tournant de M. de Broglie complétèrent la caractérisation de ces rayonnements et jetèrent les bases de l'analyse quantitative par les rayons X qui prit son essor en 1923 avec les expériences de D. Coster et de G. de Hevesy.

## La production des rayons X

### Les générateurs de rayons X

La production des rayons X est obtenue dans tous les générateurs par le même phénomène : des électrons accélérés sont projetés sur une cible et, au cours des interactions qu'ils subissent avec la matière de cette cible, une partie de leur énergie cinétique est transformée en photons.

L'énergie maximale des rayons X est égale à l'énergie cinétique des électrons qui les ont produits. Comme les différentes applications, et en particulier la radiothérapie, nécessitent l'utilisation de rayons X dont l'énergie s'étend sur un très large domaine, de quelques keV à quelques dizaines de MeV, on est conduit à réaliser des faisceaux d'électrons auxquels sont communiquées des énergies de cet ordre.

Les générateurs de rayons X sont donc constitués de trois organes principaux : un générateur d'électrons ; un dispositif d'accélération des électrons ; une cible.

### Le générateur d'électrons

L'émission d'électrons est obtenue par effet thermoélectrique. L'émetteur d'électrons chauffé électriquement est relié au pôle négatif d'une source extérieure de différence de potentiel. Dans l'enceinte se trouve une plaque conductrice reliée au pôle positif. Dans la diode ainsi constituée, les électrons arrachés à l'émetteur (cathode) sont accélérés sous l'action de la différence de potentiel V vers la plaque (anode ou anticathode) et créent dans le circuit un courant électrique dont l'intensité dépend :

— de la différence de potentiel appliquée V ;

— de la température du corps émetteur ; l'intensité du courant de saturation est donnée par la formule de Richardson :

$$i_s = aT^2e^{-\frac{b}{T}}$$

avec T : température absolue,
*a* et *b* : constantes,
*e* : base des logarithmes naturels ;

— du corps émetteur qui peut être une pièce de métal pur, d'un alliage (par exemple tungstène thorié) ou d'un métal recouvert d'oxydes à grand pouvoir émissif (Ba, Sr, Cs, etc.).

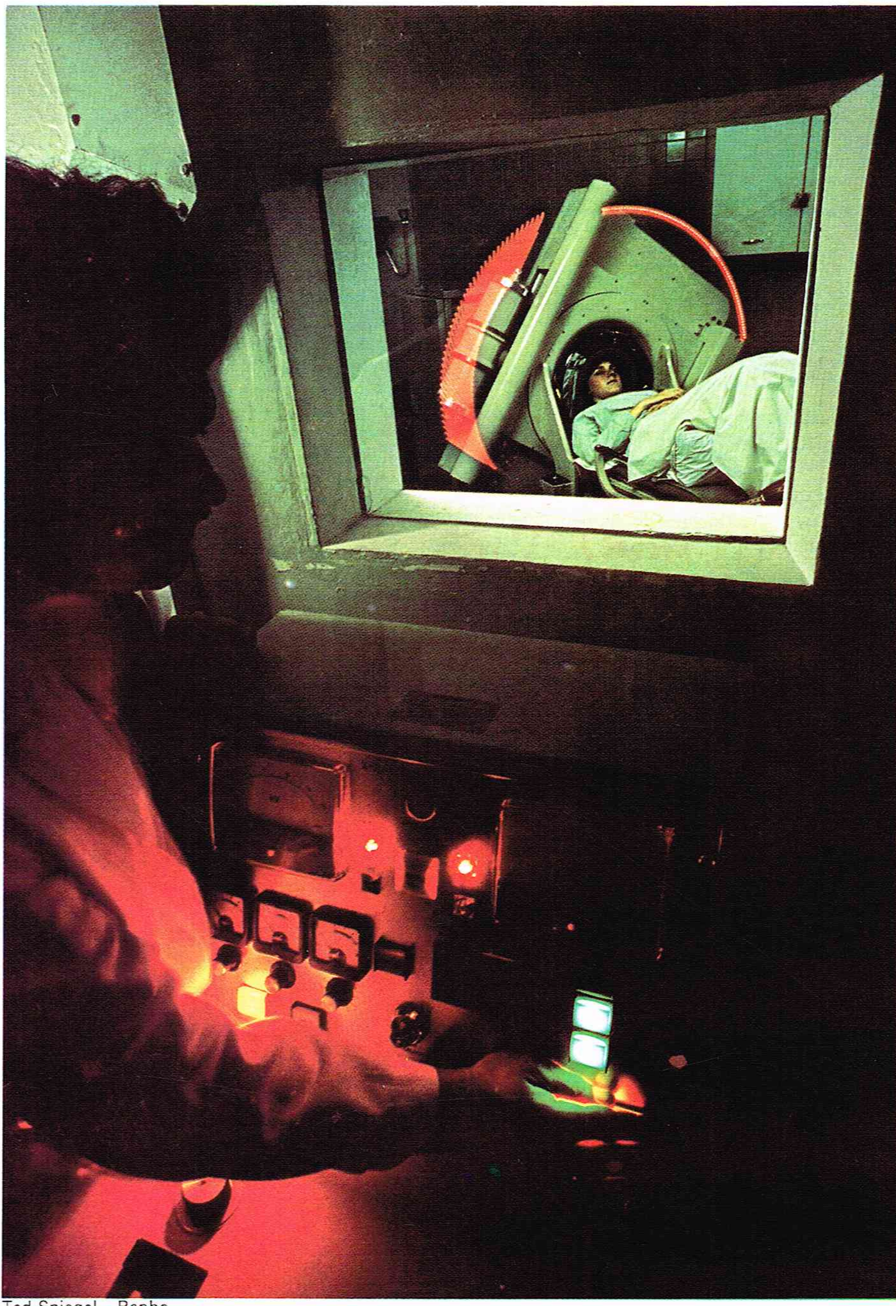
### Accélération des électrons

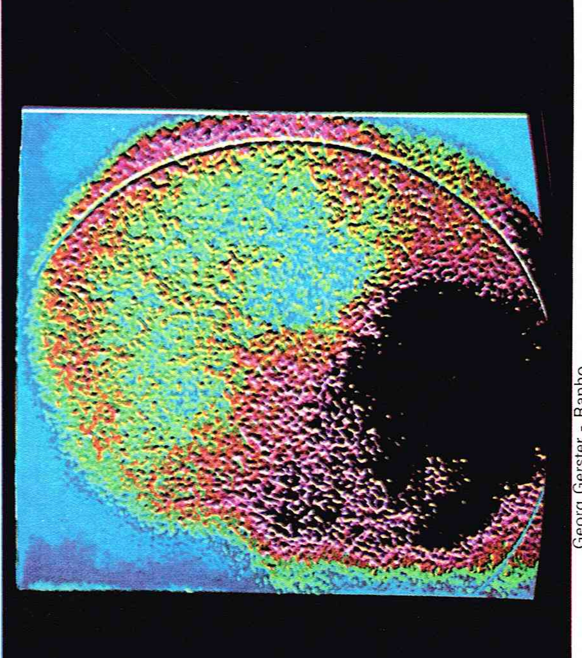
L'accélération des électrons ne doit pas être gênée par des interactions avec des corpuscules matériels se trouvant sur leur trajectoire, c'est pourquoi elle est effectuée dans une enceinte où règne un vide très poussé ($10^{-7}$ torr), qui constitue le tube à rayons X.

Les électrons sont accélérés par :

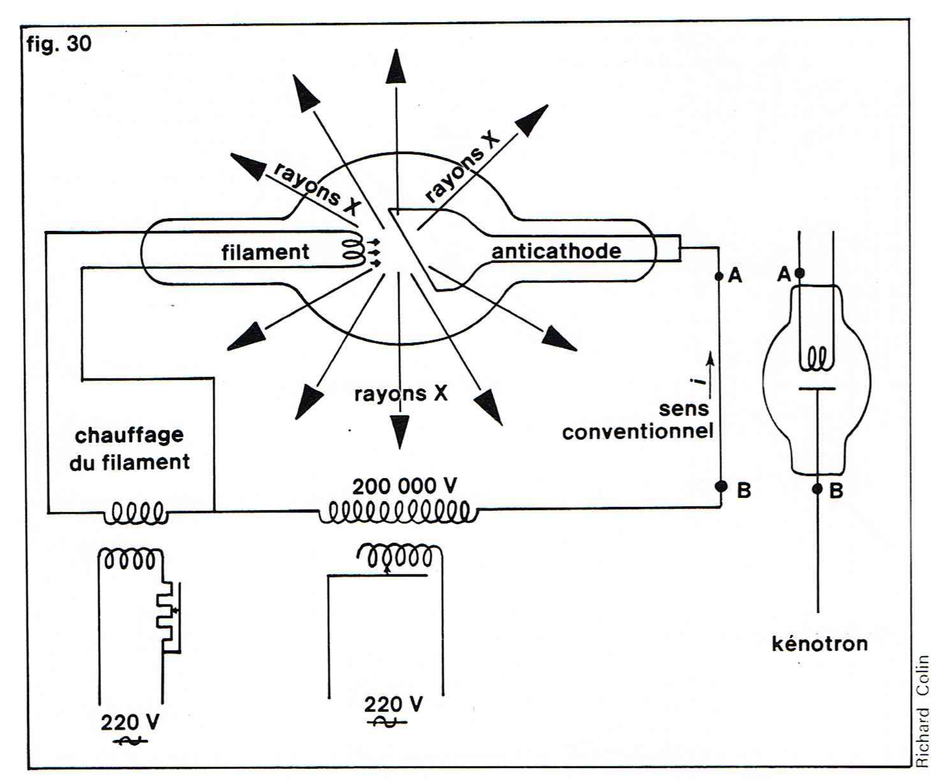
— accélérateur électrique : le principe toujours utilisé est celui du tube de Coolidge (*fig.* 30) dans lequel le filament qui constitue la source d'électrons est placé en face d'une plaque métallique (anticathode), une différence de potentiel élevée étant établie entre filament et anticathode.

— accélérateur magnétique d'électrons : c'est le principe des bêtatrons. Des électrons sont injectés à intervalles réguliers dans un champ magnétique de 5 000 gauss environ, produit par un électro-aimant alimenté par un courant dont la fréquence est de l'ordre


Ted Spiegel - Rapho


Georg Gerster - Rapho

▲◄ *En haut, réalisation d'une radiographie totale du cerveau par balayage latéral et rotationnel d'un faisceau de rayons X. Cette technique, appelée* **tomographie**, *permet une localisation précise des lésions dans l'espace. Ci-contre, la densité d'absorption des rayons X par le cerveau a été traduite en couleurs grâce à une analyse réalisée par un ordinateur.*




▲ *Figure 30 : tube à rayons X (ou tube de Coolidge) et ses circuits d'alimentation.*

de 200 cycles/seconde. Dans l'entrefer est placée une chambre annulaire où existe un vide très poussé et dans laquelle tournent les électrons. L'émission des rayons X se produit sous forme de jets discontinus (rayons X pulsés) dont le débit est extrêmement élevé.

**La cible**

Les électrons accélérés sont projetés sur une plaque de métal : la cible. Le métal choisi présente généralement un numéro atomique et une température de fusion élevés ; en effet, bien que la surface d'impact des électrons (foyer) soit relativement grande (environ 1 $cm^2$), la quantité de chaleur dégagée est importante, de l'ordre de quelques kW, et pose de sérieux problèmes de refroidissement.

**L'émission X produite par les générateurs**

Les interactions des électrons accélérés avec les atomes de la cible sont de deux sortes :

* *Collision*

L'électron incident arrache un électron d'une couche de l'atome qui devient ionisé et subit un réarrangement électronique : l'emplacement vide tend à être reporté sur la couche la plus externe. Au cours de ce réarrangement, un ou plusieurs électrons effectuent un saut, l'excédent d'énergie après chaque saut étant rayonné sous forme de *photons de fluorescence* dont l'énergie dépend seulement de la nature des atomes de la cible. Ces photons de fluorescence sont distribués selon un spectre de raies qui est le spectre caractéristique des atomes considérés.

Pour une cible de tungstène, par exemple, on obtient :

- pour une ionisation de la couche K, des raies X de 59,5, 67 et 69 keV selon que le saut va des couches L, M ou N vers la couche K ;
- pour une ionisation de la couche L, des raies X de 8 à 12 keV ;
- pour une ionisation de la couche M, des raies X de 1,4 à 2,5 keV.

L'émission de rayons X d'énergie supérieure à 1 keV ne se produit :

- sur la couche N que si $Z > 85$ ;
- sur la couche M que si $Z > 50$ ;
- sur la couche L que si $Z > 30$ ;
- sur la couche K que si $Z > 10$.

Les éléments légers ($Z < 10$) ne peuvent donc pas émettre des rayons X de fluorescence de plus de 1 keV d'énergie ; dans les atomes lourds, seules les couches K, L, M peuvent les produire.

* *Freinage ou Bremsstrahlung*

Un électron incident d'énergie $E_0$ passant au voisinage d'un noyau subit un brusque ralentissement ; l'énergie cinétique qu'il perd est rayonnée sous forme de photons dont l'énergie peut avoir n'importe quelle valeur entre 0 et $E_0$, et les photons de freinage sont distribués selon un spectre continu.

L'énergie retenue par la cible correspond à l'absorption des composantes de faible énergie qui représentent une fraction du spectre d'autant plus petite que l'énergie $E_0$ des électrons incidents est plus élevée.

Le phénomène de freinage et la production des rayons X qu'il provoque deviennent de plus en plus importants à mesure que l'énergie des électrons augmente et que le Z de la cible est plus élevé. La dissipation de chaleur dans la cible est d'autant plus faible que les collisions participent moins à la production de rayons X.

***Les autres procédés de génération de la fluorescence X***

La production des rayons X par les tubes générateurs X permet d'obtenir, comme nous venons de le voir, des spectres X continus en énergie. Il est toutefois intéressant de produire des spectres de raies X caractéristiques des éléments. Ces raies de fluorescence X peuvent être obtenues de différentes manières : fluorescence X-X provenant de l'excitation d'une cible par un rayonnement X d'énergie plus élevée que celles des raies caractéristiques de cette cible ; fluorescences $\beta$-X, $\alpha$-X, $p$-X, etc., qui sont autant de variantes de la méthode précédente avec simplement la substitution d'une source radio-active $\beta$ ou $\alpha$ au générateur X utilisé dans la fluorescence X-X ; rayonnement laser.

***Désintégration radio-active de certains radionucléides***

Les radionucléides ont différents modes de désintégration possibles ; l'un d'entre eux, la désintégration par capture électronique, conduit à l'émission de rayons X. Le principe de cette désintégration est le suivant : lorsqu'un noyau ne dispose pas de l'énergie suffisante pour créer un électron positif, il utilise un autre mode de transition isobarique concurrent de la désintégration $\beta^+$. Dans ce cas, un électron du cortège électronique est absorbé par le noyau et, comme dans la désintégration $\beta^+$, c'est un proton qui se transforme en neutron à l'intérieur du noyau, suivant la réaction ci-après :

$$^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e^{-} \rightarrow {}^{1}_{0}n$$

Le processus de capture électronique entraîne un changement de Z qui devient $Z-1$, mais le nombre de masse A ne change pas. Il n'y a pas de rayonnement nucléaire émis, puisqu'il n'y a pas d'électron créé, mais la capture d'un électron de l'orbite électronique de l'atome provoque un réarrangement des couches électroniques avec production de rayons X et d'électrons Auger.

Exemple : $^{58}_{27}Co + {}^{0}_{-1}e^{-} \rightarrow {}^{58}_{26}Fe$ + rayons X

$^{55}_{26}Fe + {}^{0}_{-1}e^{-} \rightarrow {}^{55}_{25}Mn$ + rayons X

## *Propriétés des rayons X*

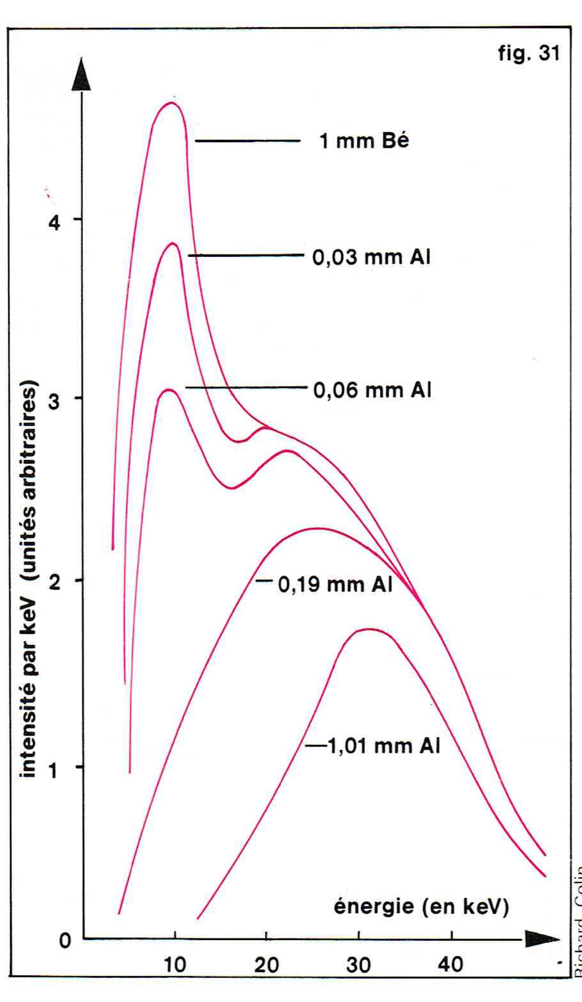
### *Caractérisation d'un faisceau de rayons X*

Pour définir l'émission X, il faut caractériser à la fois la quantité, la qualité et la direction du faisceau.

**Quantité de rayonnement**

Elle peut être définie en énergie (ergs) ; dans un tube générateur de rayons X, elle est proportionnelle au nombre d'électrons qui frappent l'anticathode, c'est-à-dire au courant $i$ qui traverse le tube. La quantité de rayonnement dépend aussi de l'énergie $E_0$ des électrons et du numéro atomique Z de la cible, puisque l'énergie transférée aux rayons X par les phénomènes de collision et de freinage dépend de ces deux facteurs.

On admet en première approximation que l'énergie convertie en rayons X de freinage, pour un électron d'énergie $E_0$ exprimée en MeV, est approximativement égale à $ZE_0^2$, ce qui revient à dire : que l'intensité du flux augmente d'un facteur 9 quand la différence de potentiel




◄ *Figure 31 : spectres de rayons X de 50 kV pour différentes filtrations : la courbe du haut correspond à la filtration par une mince fenêtre de béryllium, les autres à la filtration par des fenêtres d'aluminium de différentes épaisseurs.*

passe de 100 kV à 300 kV ; que l'intensité du flux croît proportionnellement au numéro atomique de la cible ; que le matériau utilisé comme cible doit avoir un point de fusion élevé. C'est pourquoi on utilise habituellement le tungstène (Z = 74 ; température de fusion : 3 370 °C).

### Qualité du rayonnement

Elle est définie par la distribution spectrale des rayons X produits par le générateur qui est elle-même la superposition du spectre de raies des photons de fluorescence et du spectre continu des photons de freinage. L'énergie maximale des photons de freinage est égale à l'énergie $E_0$ des électrons incidents ; cette valeur constitue la limite supérieure du spectre. Le spectre de raies pour les anticathodes classiques en tungstène se limite pratiquement à la raie $K_\alpha$ de cet élément dont l'énergie est 59,5 keV. Les raies de la couche L ont une énergie beaucoup plus faible, de l'ordre de 10 keV ; elles sont absorbées par une faible épaisseur de matière et n'émergent pratiquement pas du tube émetteur. En définitive, l'importance relative des deux spectres dépend surtout de l'énergie des électrons primaires ; en particulier, au-delà de quelques centaines de kV, le spectre de raies n'apparaît plus dans la distribution spectrale qui se limite au spectre de freinage.

La *figure* 31, qui représente un spectre de rayons X de 50 kV après différentes filtrations, met bien en évidence le phénomène de superposition du spectre de raies et du spectre continu. Elle montre que la distribution spectrale du faisceau émergent, sortant par une mince fenêtre de béryllium, fait apparaître le pic des raies caractéristiques L. Une filtration par une mince lame d'aluminium suffit à faire disparaître cette raie. Dans ce cas, l'énergie des électrons est insuffisante pour produire les raies caractéristiques K.

La *figure* 32, qui montre le spectre des rayons X produits par un bêtatron de 22,5 MV, ne fait plus apparaître que le spectre continu dû au rayonnement de freinage.

### Direction des rayons X

Le rayonnement X n'est pas isotrope, c'est-à-dire qu'il n'est pas émis de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace.

Pour une cible très mince et pour des électrons de faible énergie, l'émission des rayons X s'effectue dans toutes les directions de l'espace, avec un maximum dans une direction perpendiculaire au faisceau d'électrons. Quand l'énergie des électrons augmente, la direction où l'émission est la plus intense se rapproche progressivement de celle du faisceau d'électrons ; aux environs de 20 MeV par exemple, la moitié du rayonnement est contenue dans un cône dont l'angle au sommet est de 5 degrés environ.

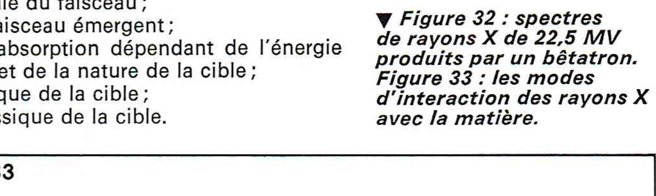
Pour une cible épaisse, la diffusion des électrons modifie leur direction et il est difficile de calculer leur distribution spatiale ; il faut dans ce cas faire appel aux techniques expérimentales pour obtenir le spectre réel.

### *Interaction des rayons X avec la matière*

Les modes d'interaction des rayons avec la matière sont représentés sur la *figure* 33 ; ce sont essentiellement :
— l'absorption du rayonnement dans la matière ;
— la diffraction du rayonnement ;
— la production de raies X de fluorescence.

### Absorption des rayons X

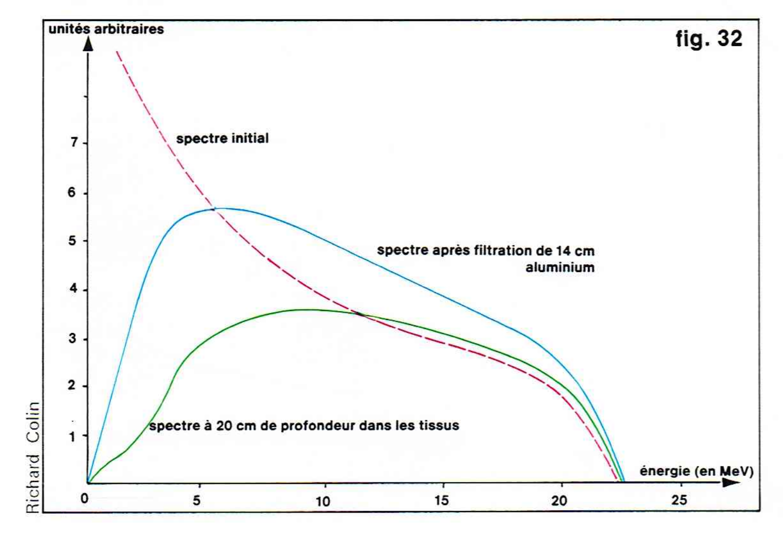
C'est le mode d'interaction le plus connu ; il a été très rapidement mis en évidence par Rœntgen. La loi d'absorption est :

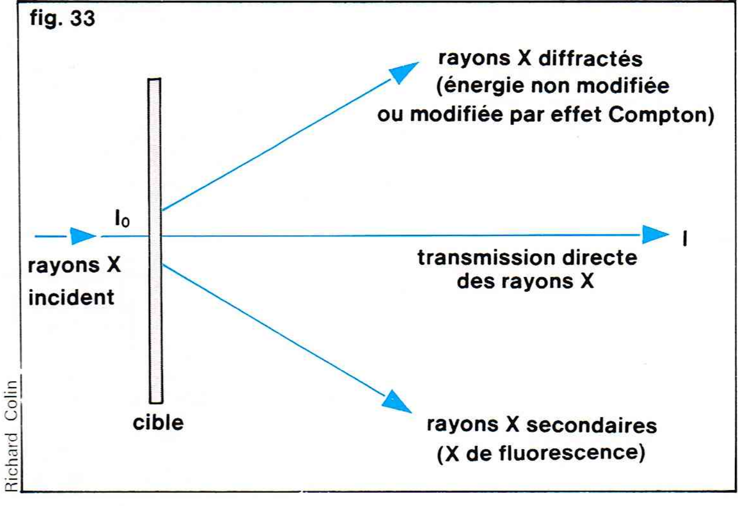


$$I = I_0 e^{-\mu \cdot \rho \cdot d}$$

avec $I_0$ : intensité initiale du faisceau ;
$I$ : intensité du faisceau émergent ;
$\mu$ : coefficient d'absorption dépendant de l'énergie des rayons X et de la nature de la cible ;
$\rho$ : masse spécifique de la cible ;
$d$ : épaisseur massique de la cible.

▼ *Figure 32 : spectres de rayons X de 22,5 MV produits par un bêtatron. Figure 33 : les modes d'interaction des rayons X avec la matière.*



*▶ Tableau V : absorption dans le cuivre et l'aluminium de rayons X de différentes énergies.*

**Tableau V**

**Absorption dans le cuivre et l'aluminium de rayons X de différentes énergies**

| Énergie (en keV) | | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1 000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Intensité transmise | par 1 mm de cuivre | $10^{-83}$ | $10^{-30}$ | $10^{-13}$ | $10^{-5}$ | 1,5 % | 11 % | 68 % | 87,5 % | 93 % | 95 % |
| | par 1 mm d'aluminium | $10^{-3}$ | 12 % | 40 % | 75 % | 87 % | 91 % | 95,5 % | 97 % | 98 % | 99 % |

*▶ Page ci-contre, deux exemples de l'utilisation des rayons X dans le domaine médical : en haut, la radiographie d'une main ; au milieu, la radiographie d'un estomac.*

Le *tableau* V montre les parcours dans le cuivre et l'aluminium de faisceaux X monochromatiques pour différentes énergies.

### Diffraction du rayonnement

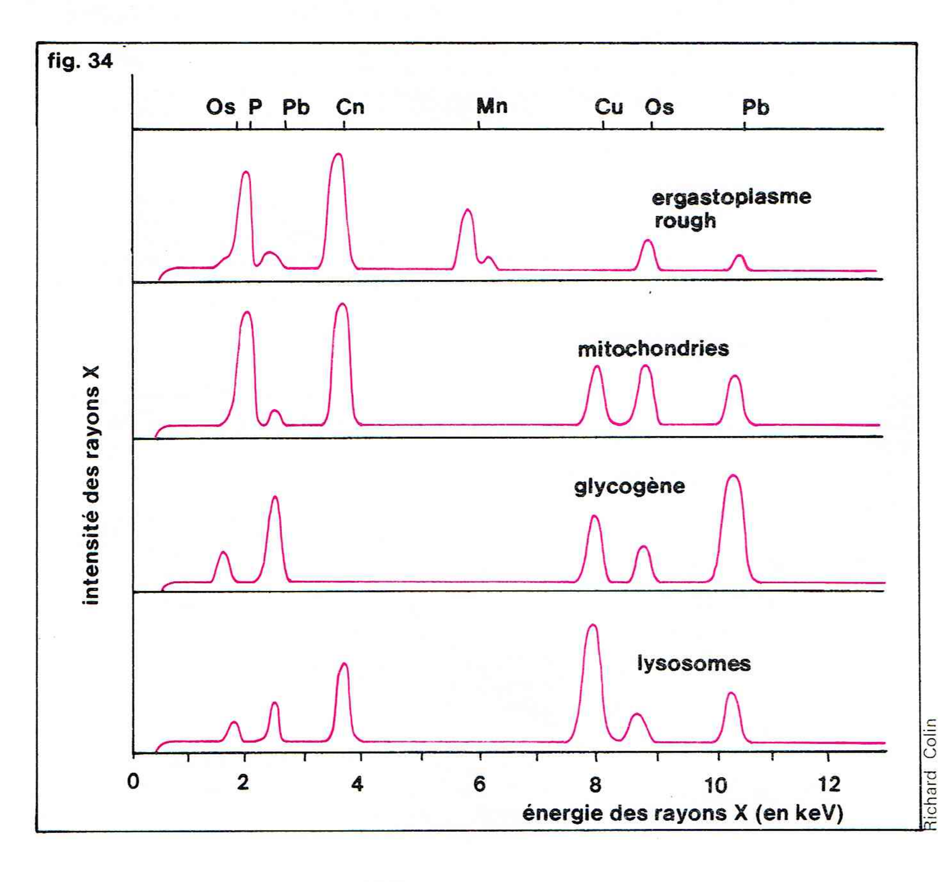
C'est le phénomène de déviation de la trajectoire des photons qui s'effectue sans altération de l'énergie (sauf dans le cas d'un effet Compton). La diffraction est sensible à l'association d'éléments en composés, aux traitements thermiques et parfois aux déformations mécaniques, ce qui présente un très grand intérêt dans les applications analytiques.

La diffraction par les rayons X ne peut cependant être utilisée que pour des rayonnements dont la longueur d'onde est de l'ordre de la distance réticulaire, c'est-à-dire $10^{-7}$ mètre ; cette méthode est limitée à l'étude des rayons X de quelques dizaines de keV.

### Production de raies X de fluorescence

Les rayons X bombardant une cible produisent une émission X secondaire dont l'énergie est caractéristique de l'élément constituant la cible. C'est sur l'étude de ces raies X secondaires que reposent les méthodes d'analyse par fluorescence X qui peuvent pratiquement s'appliquer à tous les éléments de la table de Mendeleïev. Les raies X ainsi obtenues sont monochromatiques et ont une énergie variant en fonction de l'élément pris comme cible allant de 0,185 keV pour le bore à 69 keV pour le tungstène.

*▼ Figure 34 : résultats d'une analyse dispersive des structures intracellulaires par les rayons X ; chaque courbe correspond au spectre X d'une structure cellulaire.*




## Applications des rayons X

Les rayons X présentent un champ d'applications extrêmement important axé sur la détection, l'analyse et le contrôle non destructif ; il en résulte que les domaines scientifiques et techniques qui ne sont pas concernés sont très peu nombreux. La détection par les rayons X a, par conséquent, subi un essor considérable ces vingt-cinq dernières années, tant dans le domaine de la recherche fondamentale que dans celui de la recherche appliquée.

Comme il n'est pas possible de procéder à une énumération exhaustive, nous nous bornerons, dans ce qui suit, à donner quelques exemples des principales applications des rayons X.

### *Les rayons X et la recherche fondamentale*

La diffraction X est largement utilisée pour étudier les structures cristallines : par sa nature cristalline, l'échantillon à étudier joue vis-à-vis de la radiation primaire le rôle d'un réseau triplement périodique. L'analyse consiste à détecter les signes particuliers du réseau cristallin à partir des figures de diffraction obtenues. Dans le cas de métaux ou d'alliages, les figures de diffraction sont ramenées à un petit nombre de modèles correspondant à des structures cristallines compactes ou à interstices réduits.

Les microsondes actuellement utilisées sont de puissants moyens d'investigation qui permettent les analyses qualitatives et quantitatives de la microstructure des échantillons. La sensibilité de cette technique est très grande, elle permet la détection de masses de l'ordre de $10^{-12}$ gramme.

La précision de ces mesures dépend de nombreux paramètres : perfection cristalline du spécimen étudié, donc du traitement thermique et mécanique auquel il a été soumis ; de son histoire métallurgique ou chimique, pour un objet fabriqué ; histoire de notre planète, pour un minéral ; histoire du cosmos, pour une météorite.

La *figure* 34 montre la carte élémentaire des composants d'une coupe biologique telle qu'elle apparaît lors d'une analyse dispersive par les rayons X.

La recherche fondamentale en matière d'énergies nouvelles utilise aussi la détection X. Les études sur la fusion contrôlée conduisent à analyser des plasmas dont les températures sont supérieures à $10^{-6}$ °K. Ces plasmas émettent des rayons X dont la détection contribue fortement au diagnostic de la qualité de l'expérience.

Dans le domaine de la recherche spatiale, l'étude de l'émission X de l'espace au moyen de détecteurs X embarqués à bord de satellites artificiels permet de tracer une nouvelle carte du ciel, prenant ainsi le relais de la radio-astronomie.

### *Les rayons X et la médecine*

#### L'aide au diagnostic

L'utilisation des générateurs X pour la radiographie du corps humain est de loin la plus connue et la plus répandue des applications des rayons X. Ses variantes sont très nombreuses (radioscopie, radiographie, tomographie, etc.) ; elles constituent des outils fondamentaux pour la prévention et l'aide au diagnostic.

L'énergie des rayonnements X utilisés varie de 20 à 160 keV et, en général, la faible diffusion des rayons X permet d'obtenir une bonne qualité de l'image du corps traversé, comme le montre la photo qui représente une

radiographie d'une main. La radiographie des organes (intestins par exemple) qui absorbent peu les rayons X pose toutefois certains problèmes; leur mise en évidence est alors obtenue par une rétention de préparations opaques à base de sels de baryum, par exemple, comme le montre la photo qui représente la radiographie de l'estomac.

Récemment, une nouvelle technique est venue renforcer la panoplie des techniques d'aide au diagnostic. Il s'agit de la scintigraphie, dont le principe est le suivant : une molécule organique présentant une affinité particulière pour un organe est marquée par un radionucléide $^{99m}$Tc, $^{57}$Co, $^{113m}$In, qui se désintègre, soit par capture électronique, soit par transition isomérique et qui émet lors de sa désintégration radio-active des rayons X. Ces photons sont ensuite détectés au moyen d'une caméra à scintillation. L'image obtenue permet de déceler soit des lacunes, soit des fixations anormales et, par là même, de détecter des tumeurs malignes et des récidives de métastases. Les photos ci-dessous montrent une scintigraphie du cerveau dans le cas d'un homme normal et dans celui d'un homme présentant une tumeur cervicale.

### La radiothérapie

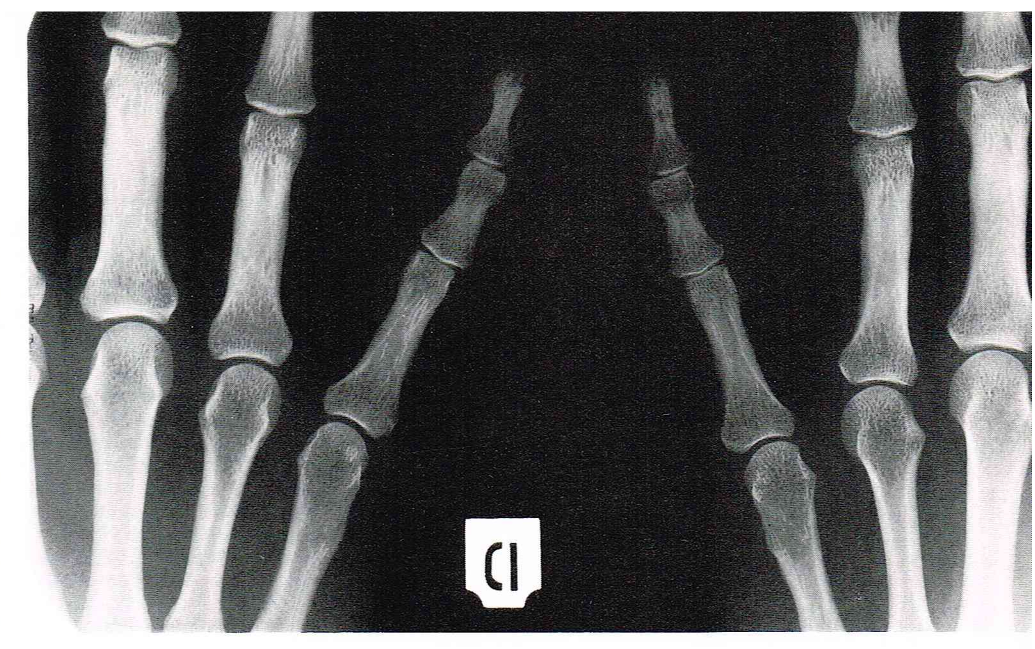
Les faisceaux de rayons X sont également utilisés pour la thérapie; deux types de thérapie sont particulièrement importants : le traitement des rhumatismes et des affections articulaires par les rayons X de quelques dizaines de keV produits par des générateurs X; le traitement du cancer, pour lequel on utilise quelquefois les générateurs X, mais beaucoup plus souvent les bêtatrons qui produisent des faisceaux d'électrons et de rayons X d'une énergie de plusieurs dizaines de MeV.

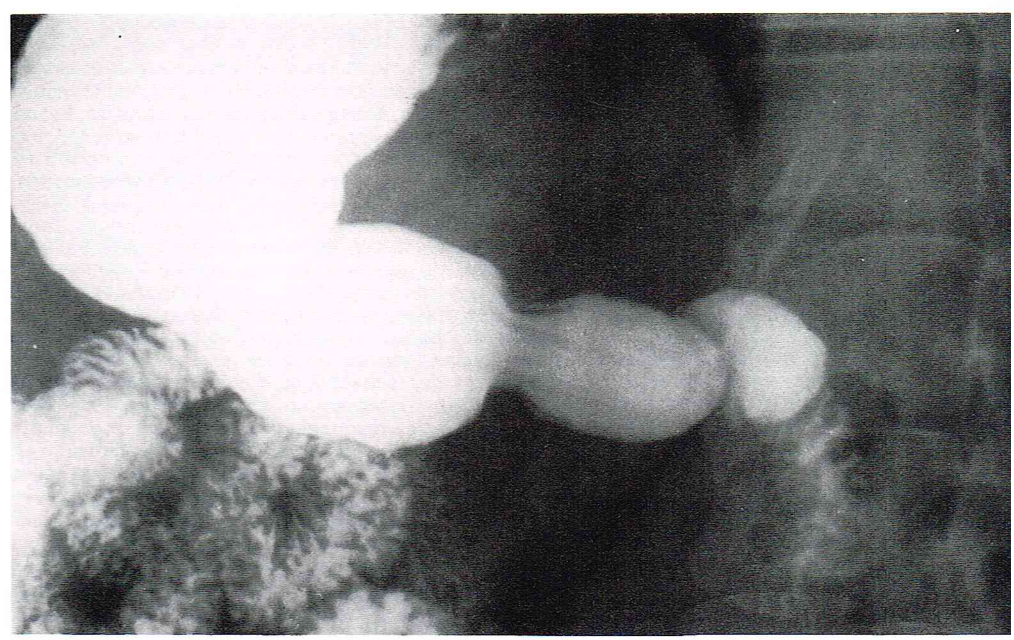
### La toxicologie

L'analyse par fluorescence X permet, en examinant des milieux biologiques, de détecter des éléments toxiques, en particulier pour les empoisonnements d'origine industrielle. C'est le cas par exemple pour le saturnisme, maladie issue d'un empoisonnement par le plomb. La détection du plomb, du cadmium, du mercure est effectuée avec une sensibilité de l'ordre de $10^{-7}$ gramme.

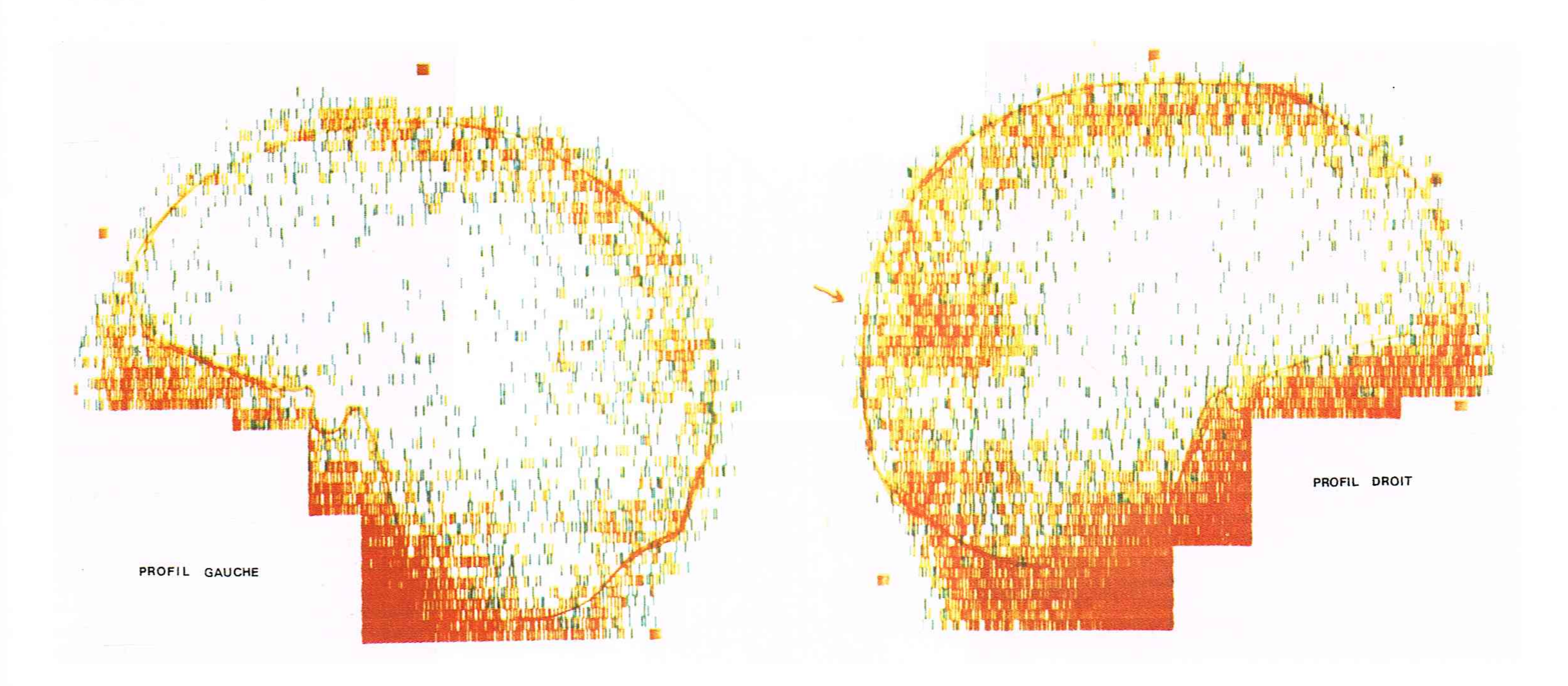
## *Les rayons X et la métallurgie*

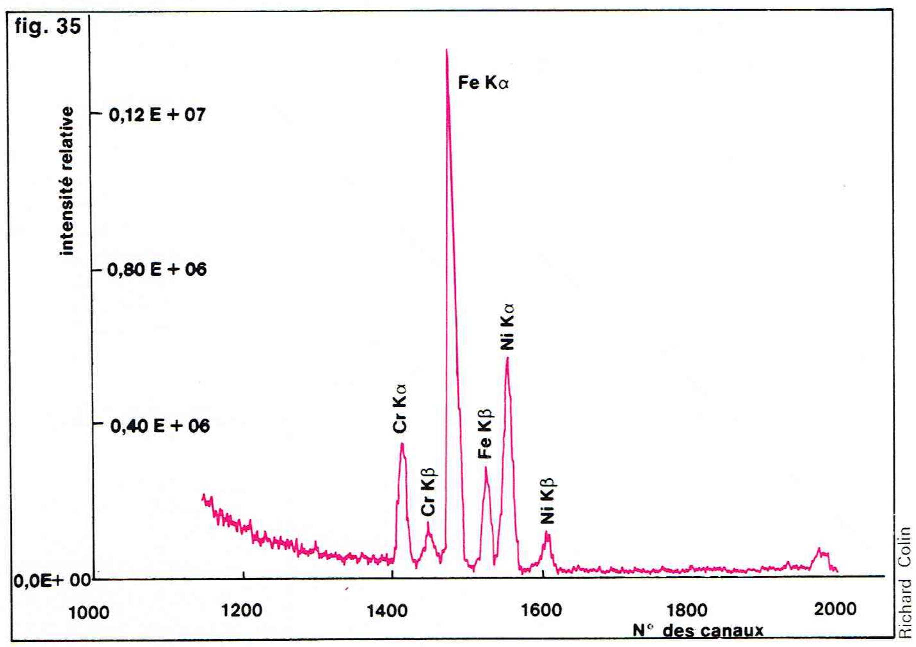
De toutes les industries, c'est très certainement dans la métallurgie que l'on utilise le plus les propriétés des rayons X. Les techniques les plus utilisées sont : la cristallographie qui permet de caractériser la structure cristalline des échantillons à étudier; la radiographie et la gammagraphie qui permettent le contrôle non destructif des objets finis, la détermination de leur qualité et l'évaluation de leur fiabilité.



**▼ *La scintigraphie fait appel à l'injection dans le corps à étudier d'un radionucléide capable en se désintégrant d'émettre des rayons X, lesquels sont détectés par une caméra à scintillation. Ici, deux scintigraphies du cerveau : à gauche, celle d'un cerveau normal; à droite, celle d'un cerveau présentant une tumeur (indiquée par la flèche).***






▲ *Figure 35 : spectre X d'un échantillon d'acier bombardé par les rayonnements d'une source de plutonium 238 ; ce spectre a été obtenu au moyen d'un spectromètre à semi-conducteur ; cette méthode est non destructive.*

▼ *Tableau VI : précision de l'analyse par fluorescence X pour les différents éléments contenus dans des échantillons d'acier. Tableau VII : précision obtenue en prospection géologique et minière par fluorescence X pour différents éléments.*

### La sidérurgie

Les laboratoires des grandes entreprises sidérurgiques sont équipés d'appareils de fluorescence X entièrement automatisés qui permettent une analyse précise et rapide des différents constituants d'un acier.

Les méthodes d'analyse par fluorescence α -.X sont en particulier utilisées pour les analyses précises non destructives des échantillons d'acier, comme le montre la *figure* 35 qui représente le spectre X d'un échantillon bombardé par les rayonnements d'une source de plutonium 238 et dont l'analyse est effectuée au moyen d'un spectromètre à semi-conducteur équipé d'un détecteur Si-Li.

Le *tableau* VI indique les précisions que l'on peut obtenir par cette méthode ; elle met en évidence la qualité des résultats obtenus, puisqu'il est possible d'obtenir des précisions de l'ordre de $10^{-4}$ pour des éléments comme le titane, dont la teneur dans les échantillons analysés est extrêmement faible.

Le contrôle de qualité des tôles galvanisées est également effectué en continu par une méthode de fluorescence X. La raie X de fluorescence du zinc est excitée par une source radio-active et les précisions obtenues sur l'épaisseur du dépôt sont de l'ordre de 5 % pour une gamme d'épaisseurs variant de 50 à 350 g/m².

### Le traitement des minerais

Les appareillages d'analyse par rayons X sont dans ce cas utilisés en ligne, c'est-à-dire qu'ils sont intégrés dans le processus de traitement. Par exemple, ils effectuent en continu l'analyse des boues de flottation et les résultats obtenus permettent le pilotage du processus de traitement des minerais. Ce procédé est utilisé en particulier pour le traitement des minerais de cuivre, de zinc et de plomb ; les précisions obtenues sur les teneurs en ces éléments sont de l'ordre de 5 %.

**Tableau VI**
**Précision de l'analyse par fluorescence X pour les différents éléments contenus dans des échantillons d'acier**

| Éléments | Fe | Si | Ca | Al | Ti | Mg | P | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Précision | 0,3 % | 0,11 % | 0,07 % | 0,06 % | 0,009 % | 0,13 % | 0,003 % | 0,004 % |

**Tableau VII**
**Précision obtenue en prospection géologique et minière par fluorescence X pour différents éléments**

| Éléments | Au | Ag | V | Mn | U | Ni | Fe | Sn | Cu | Zn | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Précision | 0,03 % | 0,02 % | 0,06 % | 0,01 % | 0,01 % | 0,1 % | 1 % | 0,05 % | 0,1 % | 0,3 % | 0,3 % |

### *Les rayons X et les autres industries*

La détection par les rayons X a de nombreuses autres applications industrielles qui présentent pour la plupart des analogies marquées, c'est pourquoi nous nous bornerons à donner les deux exemples suivants.

#### Les cimenteries

Avant de passer au four, le cru de ciment est constitué d'un mélange pulvérulent qu'il faut analyser. Deux méthodes sont généralement utilisées :

— analyse en continu du CaO par une méthode de fluorescence β-X, l'excitation étant produite par une source radio-active. Précision obtenue : 0,4 %.

— analyse par prélèvement au moyen d'un appareil classique de fluorescence X qui permet de déterminer les teneurs des différents constituants du ciment tels que Si, Al, Ca, Fe.

#### L'industrie pétrolière

L'automatisation de plus en plus poussée des raffineries de pétrole implique que la détection et le dosage des impuretés soient effectués en continu. Les méthodes de fluorescence X se prêtent fort bien à ce dosage ; en particulier, la technique d'absorptiométrie des rayons X est utilisée pour déterminer la teneur en soufre et en plomb des carburants et des naphtas.

### *Les rayons X et la géologie*

Des techniques analogues à celles utilisées en sidérurgie et dans les autres industries sont, bien entendu, utilisées pour l'analyse des échantillons géologiques, mais il est intéressant de signaler ici une application nouvelle des rayons X en matière de prospection.

La prospection géologique ou minière nécessite l'analyse d'un nombre très important d'échantillons. L'obligation d'expédier ces échantillons à des laboratoires d'analyse souvent lointains et d'attendre les résultats pour orienter les recherches a ouvert un marché à des appareils portatifs utilisant la fluorescence X excitée par une source radio-active. Ces appareils, d'un poids inférieur à 10 kg, donc aisément transportables, permettent une spectrométrie par filtres qui sélectionnent la bande d'énergie correspondant à l'énergie de la raie X de l'élément recherché. Cette analyse *in situ* n'atteint bien entendu pas les précisions de celles effectuées au laboratoire, mais les résultats obtenus sont très suffisants en prospection, comme le montre le *tableau* VII qui indique les précisions obtenues avec des teneurs de l'ordre de 100 ppm pour différents éléments sur des échantillons préalablement broyés.

Une prospection spectaculaire par les rayons X est celle qui a été effectuée par les Américains lors de l'expédition *Apollo* sur la Lune. Une sonde α-X équipait en effet le véhicule spatial pour faire une analyse du sol lunaire.

### *Les rayons X et l'agriculture*

Une des possibilités offertes par les radio-éléments qui se désintègrent par capture électronique et qui émettent des rayons X est de permettre l'étude de la fixation du fer dans une plante ; le sol est arrosé avec une solution aqueuse contenant un isotope radio-actif du fer, le $^{55}$Fe, qui émet en se désintégrant des rayons $X_K$ de 5,9 keV ; la plante absorbe la solution et l'autoradiographie de la plante permet de repérer la fixation sélective du fer.

L'analyse par fluorescence offre par ailleurs de nombreuses possibilités en agriculture :

— détermination des constituants essentiels des sols : K, Ca, Mg, Si, Cl, Zn ;

— détermination des oligo-éléments tels que Co, Cr, V, Ba, Ni, Sr à des teneurs de l'ordre de 30 ppm.

Les résultats obtenus sont en particulier exploités : pour établir des corrélations entre la nature des sols et la nutrition des végétaux ; pour doser la composition des engrais, choisir les amendements des sols et déterminer

les toxicités; pour déterminer la qualité des aliments du bétail.

### *Les rayons X et la pollution*

Il s'agit ici encore d'une application de la fluorescence X, mais qui est cette fois excitée par des particules lourdes chargées ($\alpha$, protons, ions lourds). Cette technique est particulièrement adaptée à la détection des éléments lourds ($Z > 45$) à des teneurs de 2 à 10 ppm. Très souvent, ces méthodes sont fondées sur la détection des raies $X_L$, car les raies $X_K$ ont une énergie trop grande pour les éléments de numéro atomique élevé. Dans le cas de la détection des éléments légers, la méthode est extrêmement sensible, puisqu'elle permet d'atteindre des teneurs aussi faibles que 0,1 ppm.

Cette technique d'analyse X a trouvé un champ important d'applications dans l'étude de la pollution, en particulier pour évaluer l'importance des aérosols qui se déposent dans les voies respiratoires. A titre d'exemple, citons la station de contrôle de la pollution de l'air implantée en Californie qui utilise un petit cyclotron pour produire les raies X de fluorescence et qui permet de doser quotidiennement 700 prélèvements d'air, la détection s'effectuant à des concentrations de $10^{-9}$ g/m$^3$ d'air avec une précision de l'ordre de 10 %.

### *Les rayons X et la recherche criminologique et judiciaire*

L'aptitude des rayons X à produire des radiographies très sensibles et à détecter les traces en fait un outil incomparable pour la recherche criminologique et judiciaire. Voici leurs principales applications : contrôle de police aux aéroports permettant de détecter des armes dans les bagages; contrôle de douane pour détecter l'or aux frontières; identification des traces les plus diverses, telles que peinture, poudre, etc., dans le cadre des enquêtes de la police judiciaire.

### *Les rayons X et l'art*

La radiographie par les rayons X, l'analyse par fluorescence X non dispersive sont des moyens très puissants et qui ont l'avantage, incommensurable lorsqu'il s'agit d'œuvres d'art, d'être non destructifs.

Une des premières utilisations a été l'authentification des peintures célèbres. La détection repose sur la différence de composition des peintures, sur la présence ou l'absence de sels de titane dans les pigments.

De même, la radiographie de sculptures, de momies égyptiennes, etc., donne de précieuses indications sur les techniques de fabrication utilisées.

Une autre application de la diffraction X est l'étude des dégradations subies par une œuvre d'art et des possibilités de restauration. Cette technique a été utilisée par exemple pour la restauration des fresques abimées par les inondations de Florence.

Dans le domaine de l'archéologie, enfin, la fluorescence X a été utilisée pour étudier les monnaies anciennes et, à partir d'analyses non destructives des poteries, localiser les ateliers de fabrication.

## *Conclusions*

Nous n'avons évoqué dans ce qui précède que quelques possibilités de détection par les rayonnements X; il est clair que les propriétés de ces rayonnements, qui permettent la détection et l'analyse sans pour autant détruire l'objet ou l'échantillon à étudier en font un outil indispensable à la recherche fondamentale, aussi bien qu'à la recherche appliquée, et que l'homme, dans sa soif de connaître, ne manquera pas de trouver encore beaucoup d'autres utilisations des rayons X.

## BIBLIOGRAPHIE

BROGLIE M. de, *Introduction à la physique des rayons X*, Paris, Gauthier-Villars, 1928. - EBERMART J.-P., *Méthodes physiques d'études des minéraux*, Paris, Douin. - HEVESY G. de, *Advances in Radiobiology*, Édimbourg, 1957. - LAMARQUE P., *Bases physiques de la rœntgenthérapie*, Paris, Masson. - TUBIANA M., DUTREIX J., DUTREIX A., *Bases physiques de la radiothérapie*, Paris, Masson.

# *Les méthodes de contrôle non destructif des matériaux et structures*

Lors de la conception d'une pièce ou d'une structure mécanique, les ingénieurs du bureau d'études en calculent les dimensions, en définissent la géométrie, choisissent le ou les matériaux ainsi que les procédés de fabrication, de telle sorte que les caractéristiques du produit obtenu répondent aux besoins de l'utilisateur tant sur le plan de la fonction que sur celui de la durée d'usage.

A ce niveau de la réalisation, on suppose que le matériau employé ne contient pas de défauts susceptibles de modifier ses propriétés mécaniques par rapport à celles prévues, et que les techniques de fabrication ne sont pas génératrices d'imperfections nuisibles à la qualité du produit fini, créant le risque d'une détérioration prématurée et catastrophique.

Il apparaît donc nécessaire de s'assurer à tous les stades de la fabrication de la qualité du matériau, des éléments, des assemblages et enfin de la structure complète. En particulier, il faut pouvoir déceler au sein du matériau la présence éventuelle de défauts dangereux, c'est-à-dire pouvant entraîner une rupture prématurée ou tout au moins une diminution trop importante des propriétés mécaniques, sans que cela modifie en quoi que ce soit les caractéristiques dimensionnelles, géométriques, physiques et chimiques de la pièce contrôlée.

Les catégories de défauts nuisibles sont très nombreuses : hétérogénéité du matériau, fissures ou criques, inclusions gazeuses ou solides, tapures de trempe, etc. Il existe, pour les déceler sans destruction de la pièce, un très grand nombre de techniques dont les domaines d'applications sont plus ou moins étendus et dont la sensibilité est plus ou moins grande.

Une méthode de contrôle non destructif idéale devrait apporter une réponse précise au groupe de questions suivant :

— Existe-t-il un défaut?
— Quelle est sa position au sein du matériau?
— Quelles en sont les caractéristiques et la nature (dimensions, nocivité, etc.)?

De plus, elle devrait être suffisamment précise pour qu'à la lumière des informations qu'elle apporte, il soit possible de prendre une décision avec un risque d'erreur aussi faible que possible quant à l'utilisation ou à la non-utilisation de la pièce.

Parmi toutes les méthodes, nous verrons qu'il n'en existe pas d'idéale, mais que chacune d'entre elles a des qualités propres qui la rendent mieux adaptée à certains types de problèmes qu'à d'autres.

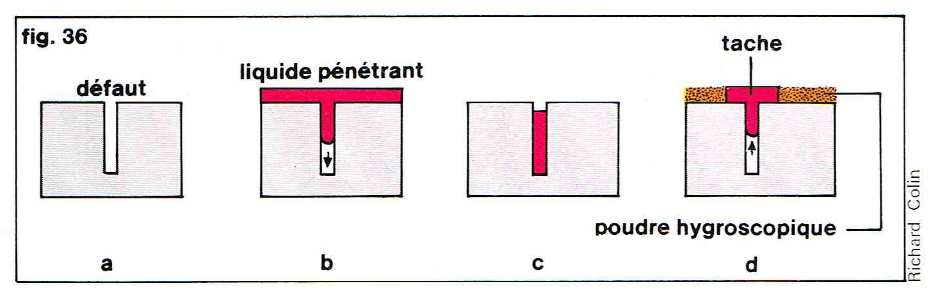
Nous passerons en revue dans ce qui suit celles qui, à l'heure actuelle, sont les plus utilisées dans l'industrie et le laboratoire, en insistant plus particulièrement sur les méthodes qui sont en train de se développer et dont on peut penser qu'elles remplaceront dans l'avenir un certain nombre des techniques actuellement en usage.

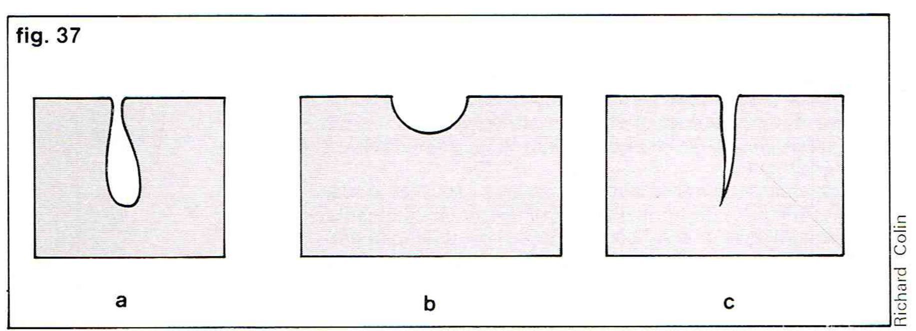
## *Ressuage*

Le ressuage est un procédé de détection des défauts qui débouchent à la surface de la pièce que l'on désire contrôler.

Le principe en est extrêmement simple (*fig.* 36) : on répand sur la surface à examiner un produit de couleur caractéristique, dont le pouvoir mouillant est très important, et qui va pénétrer dans les cavités qui débouchent en surface. On ôte ensuite très soigneusement l'excès de substance pénétrante, puis l'on dépose une poudre hygroscopique afin d'absorber le liquide qui subsiste, après le nettoyage, à l'intérieur des cavités. La présence d'un défaut se traduira par une tache de taille plus ou moins importante selon le volume de pénétrant qui a ressué. Les produits employés sont généralement à base de pétrole et de couleur rouge. Certains sont fluorescents sous éclairage aux rayons ultraviolets. Dans tous les cas, on recherche un contraste suffisamment bon pour que l'examen visuel des taches donne les informations les plus précises possibles.

Le ressuage est un procédé très simple qui permet de détecter des défauts débouchant en surface, et ceux-ci




▲ *Figure 36 : principe de détection des défauts à la surface d'une pièce par la technique de ressuage aux pénétrants liquides; a, défaut à détecter; b, aspersion du liquide pénétrant; c, nettoyage de la surface; d, détection par formation d'une tache. Figure 37; la sensibilité du ressuage est liée à la forme et aux dimensions du défaut : a, bonne détection; b, mauvaise détection; c, détection difficile.*

▶ *Tableau VIII : vitesses $V_L$ et $V_T$ des ondes ultrasonores dans différents matériaux.*

uniquement; il en détermine, bien sûr, la position, mais ne donne qu'une indication très grossière sur la nature et la taille des défauts. La forme et la dimension de la tache peuvent être analysées pour tenter d'obtenir des informations sur ces deux derniers points, mais le nombre de paramètres qui interviennent (temps de pénétration, efficacité du nettoyage, durée du ressuage proprement dit, forme de l'ouverture de la cavité, etc.) rend difficile une évaluation quantitative suffisamment précise (*fig.* 37).

La mise en œuvre de cette méthode nécessite un certain nombre de précautions :

— l'état de la surface de la pièce examinée et sa propreté doivent être bons pour éviter la présence de *points de retenue* du pénétrant qui donneraient une multitude de taches, créant ainsi une sorte de « bruit de fond » où il serait difficile de déceler un défaut réellement important.

— un soin tout particulier doit être apporté à la réalisation des différentes phases du ressuage (nettoyage, durée de pénétration, etc.).

— l'interprétation des résultats doit être faite avec la plus grande prudence, en particulier si les fissures ont une ouverture trop fine pour que le produit puisse y pénétrer facilement, ou bien au contraire si les cavités sont trop largement ouvertes pour que le pénétrant y subsiste après la phase de nettoyage; ces défauts ne seront pas décelés au cours de l'opération de ressuage.

## Méthodes ultrasonores

La recherche des défauts par ultrasons consiste à analyser les perturbations créées par des hétérogénéités existant au sein d'un matériau sur un faisceau d'ultrasons qui s'y propage.

Avant de décrire les techniques de contrôle non destructif utilisant les ultrasons, il est nécessaire de rappeler les lois physiques qui en régissent le comportement ainsi que les procédés d'émission et de détection.

### Rappel des lois physiques de propagation

Les ultrasons sont des ondes élastiques de fréquences supérieures aux fréquences audibles (supérieures à 20 kHz) ; pour le contrôle, on utilise des fréquences comprises entre 500 kHz et 20 MHz. Ces ondes se propagent dans les matériaux avec des vitesses qui sont fonction des propriétés mécaniques de ceux-ci.

Trois modes de propagation sont susceptibles de coexister dans un milieu donné.

● Citons tout d'abord les *ondes longitudinales* ou *de compression* pour lesquelles les particules de matière sont animées d'un mouvement parallèle à la direction de propagation des ultrasons et dont la vitesse est donnée par :

$$V_L = \left\{\frac{E}{\rho}\,\frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)\,(1+\nu)}\right\}^{1/2}$$

où E = module d'Young ; $\rho$ = masse spécifique du matériau ; $\nu$ = coefficient de Poisson.

● Dans le cas des *ondes transversales* ou *de cisaillement*, les particules de matière sont en mouvement perpendiculairement à la direction de propagation. La vitesse est donnée par :

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

où G = module de Coulomb.

Ce mode de propagation n'existe pas dans les liquides.

● Les *ondes de surface* ou *ondes de Rayleigh* ne se propagent qu'à la surface du matériau et sont arrêtées par le moindre obstacle. La vitesse de ces ondes est :

$$V_S \simeq 0{,}9\ V_T$$

Il faut ajouter les *ondes de Lamb* qui ne sont mises en évidence que dans des tôles minces.

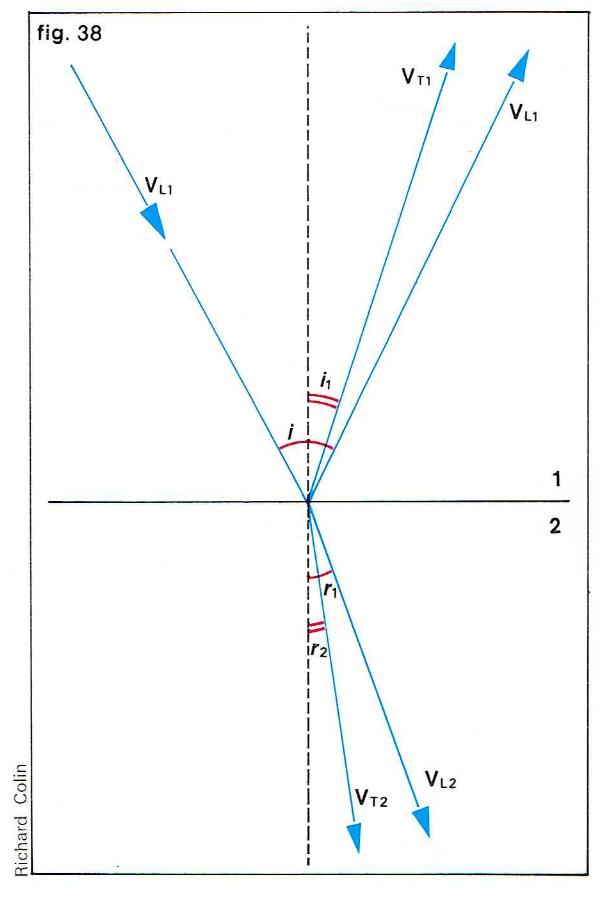
Les vitesses $V_L$ et $V_T$ des ondes ultrasonores dans différents matériaux sont données dans le *tableau* VIII.

Si l'on considère deux milieux (1) et (2) de masses spécifiques différentes ($\rho_1$ et $\rho_2$) où les vitesses de propagation des ondes longitudinales (par exemple) sont respectivement $V_{L1}$ et $V_{L2}$, on définit pour ces deux milieux deux impédances acoustiques :

$$Z_1 = \rho_1 V_{L1} \quad \text{et} \quad Z_2 = \rho_2 V_{L2}.$$

**Tableau VIII**
**Vitesses $V_L$ et $V_T$ des ondes ultrasonores dans différents matériaux**

| Matériaux | $V_L$ | $V_T$ |
|---|---|---|
| Acier | 5 800 m/s | 3 230 m/s |
| Air | 331 m/s | — |
| Eau | 1 500 m/s | — |
| Résine acrylique | 2 670 m/s | 1 120 m/s |




▶ *Figure 38 : loi de propagation des ondes ultrasonores (réflexion et réfraction).*

Lorsqu'un faisceau d'ultrasons rencontre l'interface entre les milieux (1) et (2), une partie de l'énergie incidente est réfléchie tandis qu'une part est transmise. On définit un coefficient de réflexion R, rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente :

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{E_r}{E_i}$$

et un coefficient de transmission T, rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente :

$$T = \frac{4\, Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{E_t}{E_i}$$

Bien entendu : $R + T = 1$.

On constate que, pour une interface acier-air, pratiquement 100 % de l'énergie est réfléchie ; en d'autres termes, une telle interface se comporte vis-à-vis du faisceau d'ultrasons comme un miroir parfait. C'est sur cette propriété que repose le principe de la détection par ultrasons des défauts dans les matériaux. Il faut remarquer cependant que, si cette caractéristique est favorable à la mise en évidence de défauts, elle soulève une difficulté importante quant à l'introduction des ondes ultrasonores dans le matériau et à leur détection après leur traversée de celui-ci.

Pour une interface liquide-métal, la désadaptation d'impédance est moins importante, par conséquent la part d'énergie transmise est plus élevée (par exemple, pour une séparation eau-acier, R = 88 % : 12 % de l'énergie incidente est transmise).

Lorsqu'un faisceau d'ondes ultrasonores longitudinales arrive sous une certaine incidence *i* sur l'interface entre un milieu (1) et un milieu (2) où les vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales sont respectivement $V_{L1}$, $V_{T1}$ et $V_{L2}$, $V_{T2}$, il obéit aux lois de Snell qui lient les angles de réflexion et de réfraction aux vitesses de propagation (*fig.* 38) :

$$\frac{\sin i}{V_{L1}} = \frac{\sin i_1}{V_{T1}} = \frac{\sin r_1}{V_{L2}} = \frac{\sin r_2}{V_{T2}}$$

Par conséquent, pour un mode incident donné, il y a possibilité de plusieurs modes de réflexion et de transmission avec des vitesses de propagation différentes. L'énergie du faisceau incident va se répartir entre ces différents modes.

Il existe un angle *i'* tel que :

$\sin i' = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$. Il lui correspond un angle $r'_1$ tel que

$$\sin r'_1 = 1 \qquad \text{soit } r'_1 = 90°.$$

pour cet angle *i'* par conséquent seules des ondes transversales seront transmises du milieu (1) au milieu (2).

De même, on peut déterminer un deuxième angle d'incidence *i''* tel que :

$\sin i'' = \frac{V_{L1}}{V_{T2}}$. Il lui correspond un angle $r''_2$ tel que

$$\sin r''_2 = 1 \qquad \text{soit } r''_2 = 90°$$

Pour un angle d'incidence supérieur à *i''*, il n'y a plus transmission ni d'ondes longitudinales, ni d'ondes transversales, mais uniquement création d'ondes de surface. Les angles *i'* et *i''* sont les deux *angles critiques*.

Lors de sa propagation dans un matériau, l'onde ultrasonore perd une partie de l'énergie mécanique qu'elle transporte soit sous forme de chaleur, soit sous forme d'énergie communiquée aux défauts du réseau cristallin (frottement interne). L'intensité de l'onde acoustique décroît avec *x*, distance parcourue, selon la loi :

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}$$

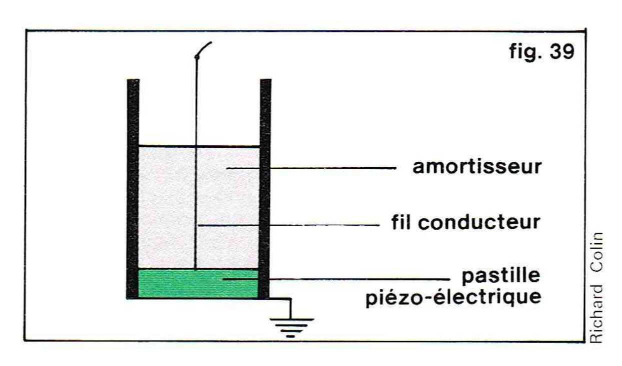
où $\alpha$ est un coefficient d'amortissement qui est une fonction croissante de la fréquence *f*, tout au moins pour les pertes d'énergie sous forme de chaleur.

### Émission et détection des ultrasons

Les ondes ultrasonores peuvent être produites par des transducteurs qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. Il y a transformation directe d'un courant alternatif en vibrations acoustiques.

Le principe de ces transducteurs est fondé sur : la piézo-électricité ; la magnétostriction ; l'électrostriction.

Pour les applications au contrôle non destructif, on emploie en règle générale des émetteurs piézo-électriques constitués d'une pastille de cristal. Sur les faces de cette lame, on dépose un revêtement métallique. Si le condensateur ainsi constitué est relié à une tension électrique alternative, l'élément piézo-électrique va se déformer et la fréquence de ce mouvement sera celle de la tension d'excitation. En particulier, si cette fréquence est telle qu'elle corresponde à une des fréquences propres de la lame, il y a résonance. Un tel transducteur, s'il reçoit des ondes ultrasonores, produit une tension électrique. Il s'agit donc non seulement d'un émetteur mais d'un récepteur d'ultrasons.




◀ ***Figure 39 : représentation schématique d'un émetteur-récepteur d'ultrasons.***

Les émetteurs-récepteurs fondés sur l'électrostriction emploient des pastilles ferro-électriques convenablement polarisées qui se déforment lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique.

Les transducteurs utilisés pour la production et la détection des trains d'ondes ultrasonores lors de la recherche de défauts dans des matériaux contiennent donc, qu'ils soient piézo-électriques ou ferro-électriques :

un élément sensible (quartz, céramique, etc.) dont l'épaisseur détermine la fréquence de travail (qui est la fréquence de résonance $F = V/2\,e$ ; F = fréquence en hertz ; V = vitesse du son en mètre/seconde ; *e* = épaisseur de la pastille en mètres) ;

un amortisseur qui a pour double rôle d'absorber les vibrations produites par la face arrière de l'élément piézo-électrique et d'amortir mécaniquement le train d'ondes (*fig.* 39).

Le champ acoustique issu d'un tel émetteur est tout d'abord constitué d'une zone de turbulence cylindrique où l'énergie se répartit irrégulièrement dans le faisceau. La longueur *d* de ce champ proche, ou zone de Fresnel est, pour un élément sensible circulaire de diamètre D, dans un milieu où les ondes ultrasonores (longitudinales par exemple) ont une vitesse de propagation V, donnée par la relation :

$$d = \frac{D^2}{4\,\lambda}$$

avec $\lambda = \frac{V}{f}$ longueur d'onde dans le milieu considéré.

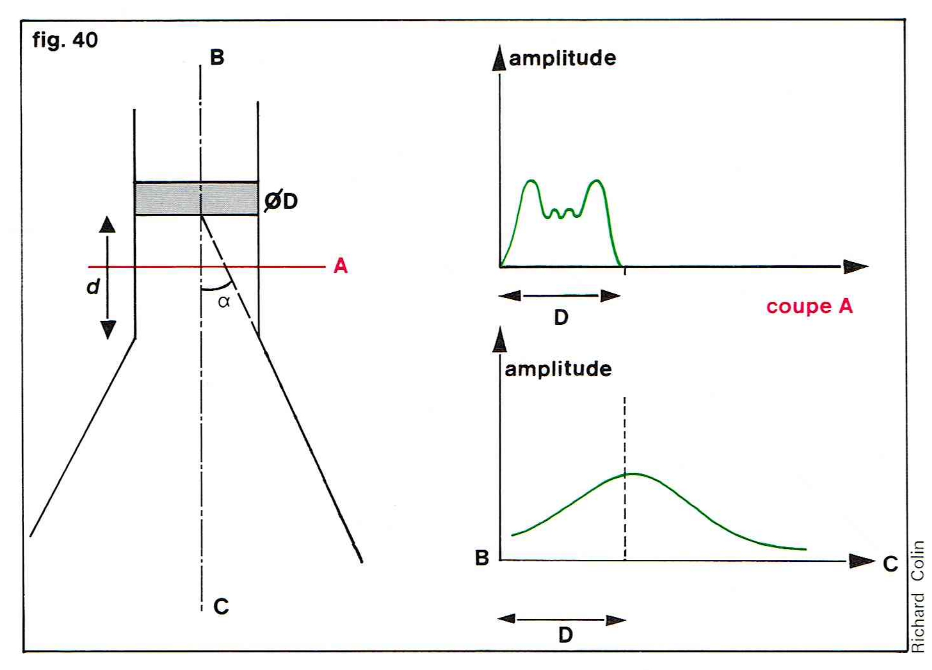
L'énergie passe par un maximum sur l'axe du faisceau à la limite du champ proche, puis décroît ensuite régulièrement et se répartit dans un cône de demi-angle au sommet $\alpha$ tel que :

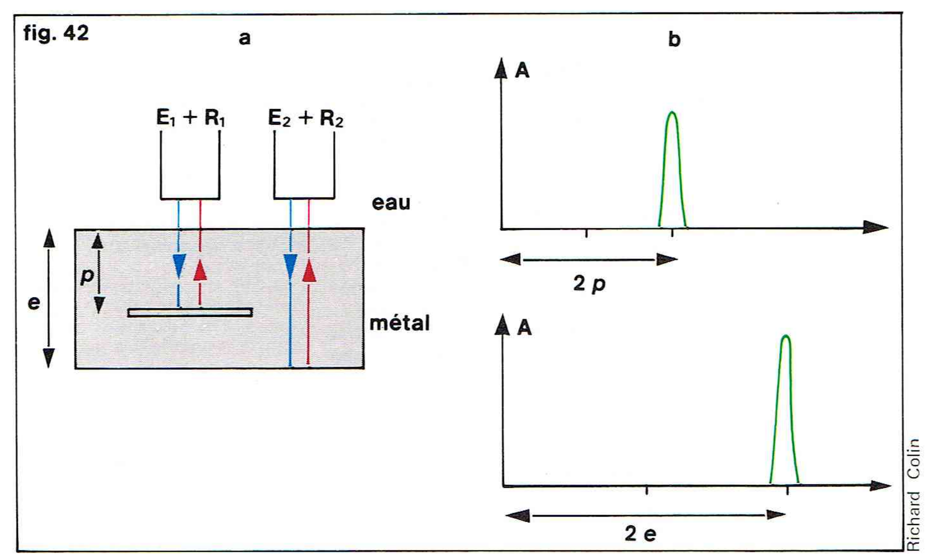
$$\sin \alpha = \frac{1{,}22\,\lambda}{D} \qquad (\textit{fig. } 40).$$

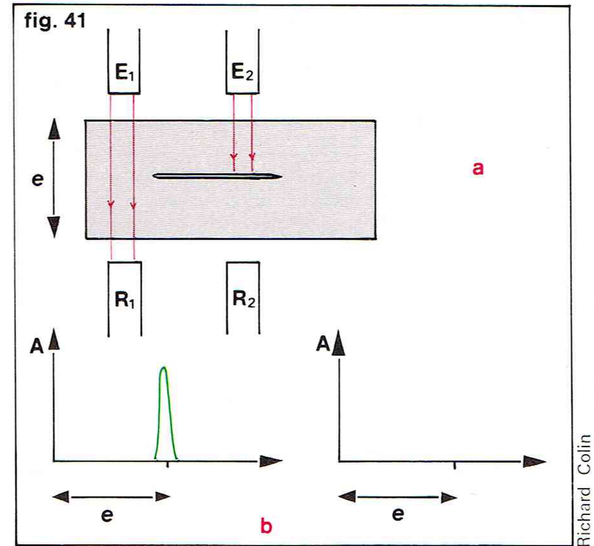
Il est intéressant de noter que, si l'on emploie une pastille de petit diamètre, on n'obtiendra pas un faisceau plus directif qu'avec un capteur de grand diamètre, puisque l'angle de divergence du faisceau croît lorsque le diamètre diminue.

Pour produire des ondes longitudinales, on emploiera des lames de quartz ou de céramique vibrant en épaisseur. L'émission d'ondes transversales sera réalisée soit avec des cristaux piézo-électriques spécialement taillés, soit, plus généralement, en donnant au faisceau d'ultrasons un angle d'incidence adéquat par rapport à la surface de la pièce examinée en interposant un prisme (« coin en plastique ») entre celle-ci et le transducteur.

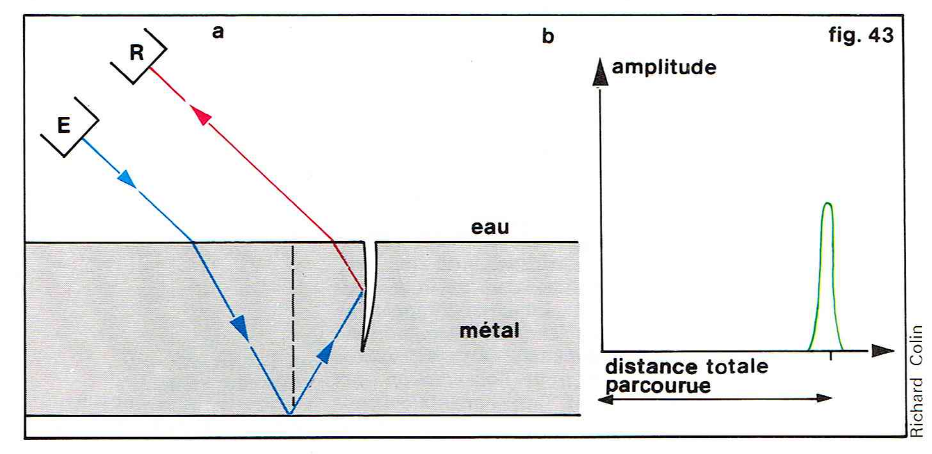
Un appareillage pour le contrôle non destructif par ultrasons se composera donc d'un générateur d'impulsions électriques ou de trains d'ondes électriques pour l'excitation de l'émetteur, d'un amplificateur à gain élevé et d'un système de visualisation pour l'observation des signaux recueillis par le récepteur. Ces éléments de base sont bien entendu complétés de circuits spécialement




▲ *Figure 41 : détection des défauts par la* méthode ultrasonore par transmission *; a, disposition du montage ; b, représentation des signaux reçus par* $R_1$ *et* $R_2$ *: à gauche, apparition d'un signal en* $R_1$*, donc pas de défaut ; à droite, disparition du signal en* $R_2$*, donc présence d'un défaut.*
*Figure 42 : détection des défauts par la* méthode ultrasonore par échographie en incidence normale *; a, montage ; b, signaux reçus par les émetteurs-récepteurs* $E_1 + R_1$ *(courbe du haut) et* $E_2 + R_2$ *(courbe du bas) : la position du signal sur l'écran indique la situation du défaut dans la pièce.*
▼ *Figure 43 : détection des défauts par la* méthode ultrasonore par échographie en incidence oblique *; a, montage ; b, signal reçu sur le récepteur R.*




étudiés pour répondre aux besoins du contrôle industriel (seuil réglable d'alarme, affichage de la distance parcourue par les ultrasons dans le matériau testé, etc.).

L'excitation à intervalles réguliers, par impulsions ou par trains d'ondes courts, permet l'utilisation du même transducteur pour remplir les fonctions d'émetteur et de récepteur : entre deux impulsions d'excitation (émission), il peut recevoir les ondes ultrasonores et les transformer en signal électrique.

**Méthodes de contrôle non destructif par ultrasons**

Nous avons vu dans ce qui précède que la présence d'un défaut, ou plus précisément d'une discontinuité d'impédance acoustique dans un matériau, avait pour conséquence la réflexion de la majeure partie d'un faisceau d'ultrasons interrompu par cette discontinuité (pratiquement 100 % s'il s'agit d'une interface métal-air). On pourra donc, pour déceler les défauts éventuels dans une pièce, analyser l'intensité de l'onde ultrasonore transmise (méthode par transmission) ou celle de l'onde réfléchie (méthode par réflexion ou par échos).

Dans le premier cas, la présence d'un défaut se traduira par une diminution importante ou par une disparition totale de l'énergie recueillie par le récepteur placé sur la face de la pièce opposée à la surface d'entrée du faisceau d'ultrasons (*fig.* 41). La disparition, sur l'écran de l'oscilloscope de l'appareil, du signal de réception normal sera le signe de l'existence d'un défaut, une indication de la surface réfléchissante qu'il présente perpendiculairement à la direction de propagation du faisceau (donc une information sur ses dimensions), mais n'apportera pas de renseignements sur la position de la discontinuité dans l'épaisseur de la pièce.

Au contraire, la présence d'un défaut se traduit en échographie par l'apparition, sur l'écran de l'oscilloscope, d'un signal dont l'amplitude est fonction de l'énergie ultrasonore réfléchie, et dont la position sur l'écran (où la base de temps est réglée de telle sorte que l'abscisse soit directement proportionnelle à la distance traversée) indique la situation au sein du matériau (*fig.* 42 et 43).

Que ce soit dans un cas ou dans l'autre, l'un des paramètres les plus importants du contrôle est l'efficacité et la constance du couplage entre le transducteur et le matériau examiné, couplage rendu nécessaire par la très basse impédance acoustique de l'air vis-à-vis du milieu testé. Il existe deux procédés principaux pour assurer cette liaison :

L'interposition d'un film d'huile ou de graisse entre l'émetteur ou le récepteur et la pièce (contrôle par contact). L'opérateur déplace le (ou les) transducteurs sur la surface de l'objet examiné pour en balayer tout le volume.

Le couplage par l'intermédiaire d'une colonne d'eau (immersion totale ou partielle). Cette dernière technique, souvent plus difficile à mettre en œuvre, offre beaucoup plus de souplesse, en particulier pour le réglage de la position relative transducteur-pièce (distance, incidence, etc.), ce qui permet de se placer dans la configu-

ration optimale, compte tenu des caractéristiques des défauts recherchés (dimensions, nature, orientation, etc.). La constance du couplage est beaucoup plus aisée à assurer en immersion, et de ce fait on peut envisager sans difficultés majeures l'automatisation de certains contrôles.

Selon la géométrie et les dimensions du produit testé, la structure du matériau, les caractéristiques des défauts recherchés, le seuil minimal de détection souhaité, les critères de rebut retenus, on choisit la méthode la mieux adaptée, le type d'onde, la fréquence du travail, etc. Un étalonnage est nécessaire pour s'assurer des qualités de sensibilité et de reproductibilité des appareillages et de la méthode. On dispose pour cela « d'étalons » normalisés adaptés aux exigences de problèmes particuliers (étalons pour la mise au point des techniques de contrôle de soudures, par exemple), mais il est en outre souvent souhaitable de réaliser une pièce de référence dont les caractéristiques sont aussi proches que possible de celles des produits contrôlés et où l'on a réalisé des défauts artificiels, images plus ou moins fidèles de ceux, réels, que l'on souhaite détecter et évaluer.

## *Radiographie X - Gammagraphie*

### Principe de la radiographie et de la gammagraphie

Lorsqu'un corps est soumis à un rayonnement X ou $\gamma$, les rayons subissent à la traversée de ce corps un affaiblissement qui dépend de la nature des matériaux et de l'épaisseur. La modulation du faisceau donne une image radiante représentative de la constitution de l'objet radiographié. Cette image radiante peut être enregistrée sur un film sensible : c'est l'image radiographique où les régions les plus claires correspondent aux parties les plus denses de l'objet et inversement.

Avant de décrire les techniques radiographiques de contrôle des matériaux, il est nécessaire de rappeler quelques notions sur la nature des rayons X et $\gamma$.

### Nature des rayons X

Sous l'action d'électrons animés de vitesse élevée, les atomes d'un matériau ainsi bombardé émettent des rayons X ; il y a transformation de l'énergie cinétique des électrons en énergie rayonnante. Les rayons X sont de même nature que les rayons lumineux et ne s'en distinguent que par leur longueur d'onde beaucoup plus courte.

### Nature des rayons $\gamma$

Les rayons $\gamma$ sont de même nature que les rayons X, mais ils sont émis spontanément lors de la désintégration des noyaux d'atomes instables. Certains corps, comme le radium, présentent à l'état naturel une émission notable, mais on utilise généralement des sources radio-actives artificielles : cobalt 60 ou tritium 192.

Nous verrons que les caractéristiques d'un rayonnement X peuvent être modifiées par simple variation des paramètres électriques de fonctionnement du générateur. Au contraire, l'émission $\gamma$, inhérente au corps constituant la source, ne peut être influencée de l'extérieur.

### Atténuation des rayons X et $\gamma$ par la matière

Pour un pinceau de rayons X ou $\gamma$, l'atténuation causée par la traversée d'une épaisseur $x$ d'un matériau est donnée par la loi classique :

$$I = I_0^{-\mu x}$$

$I_0$ = intensité incidente ; $\mu$ = coefficient d'atténuation linéique ; $x$ = épaisseur traversée.

Cette relation n'est valable que pour un rayonnement mono-énergétique, donc monochromatique, puisque l'énergie et la longueur d'onde du rayonnement sont liées par la relation d'Einstein. En effet, $\mu$ est fonction de l'énergie du rayonnement. Les générateurs usuels de rayons X ont en fait un spectre d'émission assez étendu, et la relation précédente n'est plus valable.

Plus l'énergie du rayonnement est importante, plus l'atténuation est faible ; comme $E = h/\lambda$, plus la longueur d'onde est courte, plus le rayonnement est pénétrant.

Dans le pouvoir d'atténuation d'un objet interviennent l'épaisseur et la densité mais surtout le nombre atomique du matériau constitutif : plus celui-ci sera élevé, plus l'absorption sera importante. C'est sur cette propriété qu'est fondé le contrôle non destructif par radiographie X ou $\gamma$.

### Production des rayons X - Sources de rayons $\gamma$

Le principe du tube générateur de rayons X est le suivant : un filament (tungstène par exemple) est porté à incandescence, dans le vide, par un courant d'intensité réglable. On soumet le nuage électronique ainsi constitué à une forte différence de potentiel ; les électrons sont alors entraînés à vitesse élevée vers une cible (anode) où leur énergie cinétique est transformée en énergie rayonnante pour une part, en chaleur pour une autre. Le nombre d'électrons émis, qui règle l'intensité du courant dans le tube, est fonction de la température du filament, tandis que la différence de potentiel détermine l'énergie du rayonnement.

Il existe divers types de générateurs de rayons X selon l'intensité et l'énergie que l'on veut atteindre, mais ils sont tous fondés sur le même principe et permettent d'atteindre des différences de potentiel de l'ordre de 500 kV, suffisantes pour contrôler efficacement une épaisseur de 10 cm d'acier. Pour atteindre des énergies supérieures, on doit alors employer des accélérateurs de particules qui rendent possible l'obtention d'énergies de l'ordre de 20 MeV nécessaires à la traversée de 50 cm d'acier, par exemple.

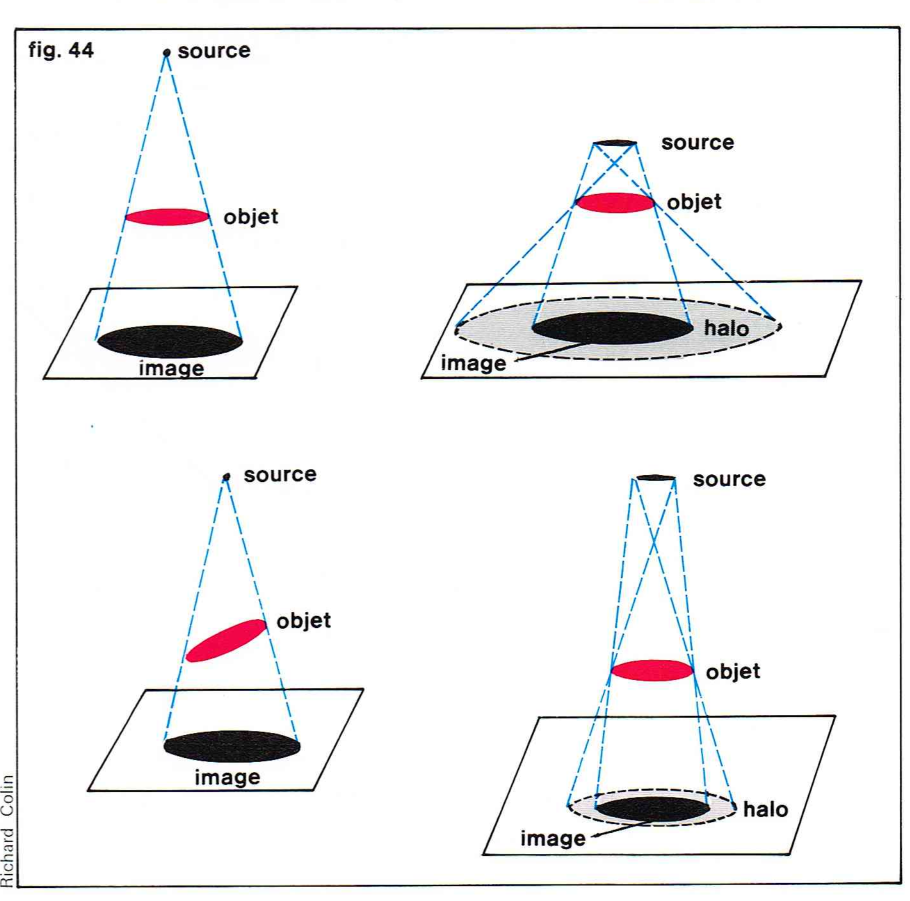
Les sources de rayons $\gamma$, quant à elles, sont peu encombrantes et fonctionnent sans apport d'énergie extérieure, ce qui, pour les contrôles en chantier par exemple, peut être un avantage important. L'énergie du rayonnement qui détermine le pouvoir de pénétration est par contre fonction de la nature de la source sans qu'il soit possible à l'opérateur d'intervenir. Le cobalt 60 donne un rayonnement à fort pouvoir pénétrant (1,2 MeV environ) tandis que l'iridium 192 donne une énergie équivalente à celle fournie par un tube de rayons X à 600 kV.

L'intensité du rayonnement $\gamma$ dépend de l'activité de la source, qui s'exprime en curies. Cette activité décroît avec le temps, ce qui impose par conséquent des corrections de temps d'exposition ou bien le renouvellement périodique des sources.

### Facteurs influant sur le contrôle radiographique

Les lois de propagation des rayons X ou $\gamma$ sont identiques à celles qui régissent la propagation de la lumière. La formation de l'image radiographique dépend de paramètres géométriques que l'on peut déterminer en considérant la formation des ombres par la lumière (*fig.* 44).

◀ ***Page ci-contre, en haut, figure 40 : champs acoustiques proche et éloigné issus d'un émetteur d'ultrasons.***




▼ ***Figure 44 : principes géométriques de la formation de l'image radiographique.***

On constate alors qu'il est nécessaire de respecter au mieux les conditions suivantes pour obtenir une image radiographique aussi représentative que possible, qualitativement et quantitativement, de la constitution de l'objet :

— la source de rayons X doit être autant que possible assimilable à une source ponctuelle.

— elle doit être aussi éloignée que possible de l'objet.

— le plan image (film) doit être aussi proche que possible de l'objet.

— la direction moyenne du faisceau doit être perpendiculaire au plan image qui doit lui-même être parallèle au plan moyen de l'objet.

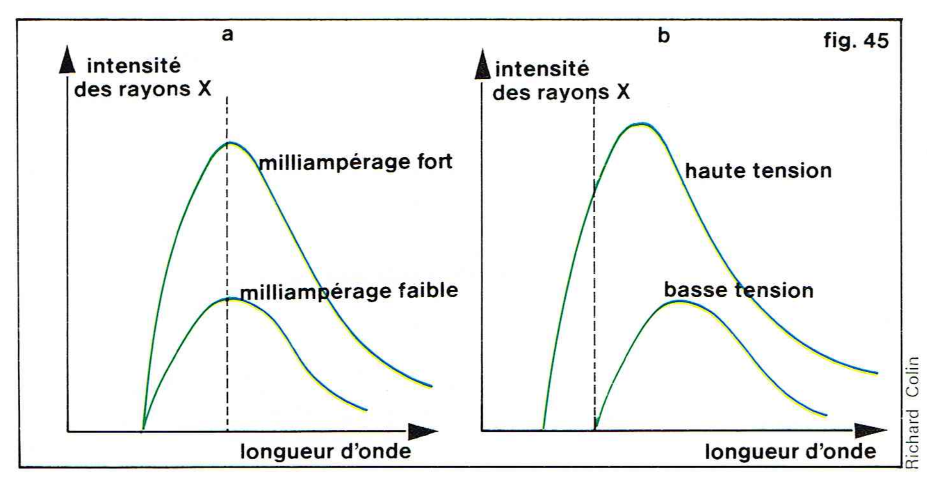
On peut concevoir des générateurs de rayons X où la surface d'émission est très faible, mais, dans ce cas, dès que l'intensité devient importante, il y a échauffement et risque de détérioration de l'anode. Pour répondre aux autres conditions, on éloigne la source autant que le permettent les conditions pratiques, et on emploie des films enfermés dans des cassettes que l'on place directement au contact de la pièce à radiographier.

L'intensité et la tension du générateur de rayons X (grandeurs sur lesquelles l'opérateur peut intervenir) n'ont pas la même influence sur la qualité du rayonnement, donc sur les conditions du contrôle. Lorsque, pour une tension donnée, on augmente l'intensité de courant dans le tube (*fig.* 45a), l'intensité du rayonnement croît mais sa composition spectrale reste identique (il n'y a pas modification du pouvoir pénétrant). Au contraire, lorsque l'on augmente la tension aux bornes du tube tout en maintenant constante l'intensité de courant, il apparaît dans le spectre des longueurs d'onde plus courtes (pouvoir pénétrant accru) en même temps que l'intensité du rayonnement augmente (*fig.* 45b).

Le contrôle radiographique des matériaux repose sur le fait que la structure interne de l'objet rencontré par le faisceau de rayons X sur son parcours module l'intensité de ce faisceau. Le film radiographique traduit cette variation d'intensité reçue par une variation de densité de l'image radiographique. Mais l'atténuation du faisceau s'accompagne d'une diffusion (rayonnement secondaire émis dans toutes les directions de l'espace) qui contribue au noircissement du film, créant ainsi un voile uniforme nuisible à la qualité de l'image.

Les rayons X ont une action plus faible que les rayons lumineux sur les émulsions photographiques. Pour augmenter la qualité de l'image, on place généralement entre le film et l'objet des écrans renforçateurs soit fluorescents (les photons X sont transformés en photons lumineux), soit métalliques (écran de plomb). Dans le premier cas, le pouvoir renforçateur est important mais la qualité de l'image n'est pas très bonne, compte tenu de la grande dimension des grains constitutifs de ces écrans et de leur épaisseur. Ils sont peu utilisés, sauf lorsqu'il est nécessaire de réduire les temps de pose. Les écrans de plomb sont par contre très employés en radiographie, en dépit de leur caractère renforçateur faible, parce qu'ils absorbent préférentiellement les rayonnements diffusés, réduisant ainsi le « bruit de fond » créé par ce rayonnement secondaire, ce qui accentue le contraste de l'image radiographique.


▼ ***Figure 45 : influence de l'intensité du courant*** (a) ***et de la tension*** (b) ***sur la composition spectrale et l'intensité du rayonnement X.***




### Indicateurs de qualité d'image

Les applications industrielles de la radiographie consistent essentiellement dans la recherche de défauts fins (fissures, etc.) dans une pièce métallique. Le contrôle sera d'autant meilleur que la définition, le contraste et la résolution de l'image radiographique seront bons. Il est donc important de connaître la qualité de la radiographie que l'on a réalisée pour en évaluer la sensibilité. On dispose pour cela de toute une gamme d'indicateurs de qualité d'image (IQI) qui, radiographiés en même temps que la pièce contrôlée, permettent de juger de la qualité de la prise de vue. Il s'agit soit de petits escaliers réalisés dans un matériau identique à celui qui est examiné (IQI de l'U. S. Bureau of Ships), soit de gradins pouvant être percés de trous (IQI Afnor), soit d'une série de fils de diamètre croissant (IQI DIN).

L'examen des images radiographiques doit être effectué dans des conditions d'éclairage appropriées pour diminuer autant que possible les risques de mauvaises interprétations de la part de l'observateur.

## *Neutronographie*

La radiographie par flux de neutrons ou neutronographie est une technique complémentaire de la radiographie X ou $\gamma$ qui n'est pas encore d'un usage courant dans l'industrie mais qui va probablement connaître, avec la multiplication des réacteurs nucléaires, un certain développement.

L'objet que l'on veut examiner est placé dans un faisceau de neutrons thermiques. Celui-ci est modulé par l'objet, et cette modulation est enregistrée sur un film radiographique après que le flux de neutrons, qui, n'étant pas ionisant, n'impressionne pas les émulsions photographiques, a été converti en rayonnement $\beta$ ou $\gamma$ grâce à des écrans métalliques spéciaux (cadmium, rhodium, etc.).

L'interaction des neutrons avec la matière se produit au niveau du noyau des atomes, alors que les rayons X ou $\gamma$ agissent au niveau des couches électroniques. Cela explique que les éléments lourds soient généralement opaques aux rayons X mais transparents aux neutrons tandis que, pour les éléments légers (riches en hydrogène, par exemple), on a le phénomène inverse.

La neutronographie est donc une méthode de contrôle utilisable, là où, compte tenu de la nature du matériau, les rayons X ou $\gamma$ sont inefficaces.

Les sources de neutrons sont : les réacteurs nucléaires ; les sources radio-isotopiques ; les accélérateurs de particules munis d'une cible appropriée.

## *Contrôle non destructif par courants de Foucault*

L'utilisation pour le contrôle non destructif des courants de Foucault induits dans un matériau métallique a fait l'objet depuis quelques années d'études théoriques très importantes qui ont conduit à la mise au point de matériels qui, en dépit de leur complexité, sont parfaitement adaptés au problème des contrôles industriels. C'est une méthode d'examen sans contact, très rapide, qui peut de plus être très facilement automatisée.

### Principe de la méthode

Une bobine (ou tout simplement un conducteur) est parcourue par un courant alternatif qui crée un champ alternatif $H_r$. Lorsque la pièce à contrôler est placée au voisinage de la bobine, le champ $H_r$ y induit des courants de Foucault de même fréquence que l'intensité circulant dans la bobine mais de phase différente. Ces courants de Foucault créent, en retour, un champ $H_i$ qui s'oppose à $H_r$ et dont l'action va se traduire par une variation de l'impédance de la bobine (*fig.* 46).

Une modification quelconque des caractéristiques de la pièce donne lieu à une modification du parcours ou de l'intensité des courants de Foucault, donc de l'impédance de la bobine. Cette dernière est définie par sa résistance R et par sa réactance $\omega L$ ($\omega = 2\pi f$, $f$ étant la fréquence du courant et L l'inductance). Lorsque le matériau à tester est loin de la bobine, ces deux paramètres ont pour valeurs $R_0$ et $\omega L_0$ qui peuvent être représentées par un point $P_0$ dans un plan d'impédance (*fig.* 47). Lorsque la pièce à

contrôler est approchée de la bobine, l'influence des courants de Foucault déplace le point $P_0$ à $P_1$ ($R_1$, $\omega L_1$). Le contrôle par courants de Foucault consiste en l'analyse des déplacements du point P qui sont fonction des propriétés de l'échantillon (conductibilité électrique, perméabilité magnétique, dimensions, défauts, température) et des caractéristiques de l'appareillage (fréquence du courant alternatif parcourant la bobine, dimensions et géométrie de celle-ci, distance entre la pièce et la bobine).

Lorsque l'on calcule l'atténuation des courants de Foucault en fonction de l'épaisseur du matériau, on montre que la densité des courants décroît exponentiellement à partir de la surface du conducteur selon la loi :

$$i_z = i_0 e^{-\gamma z} e^{-j\gamma z}$$

$i_z$ étant l'intensité à la profondeur $z$ tandis que $\gamma$ est une fonction des caractéristiques du matériau mais aussi de la fréquence de l'onde électromagnétique. Le terme en $e^{-\gamma z}$ représente l'atténuation proprement dite, le terme imaginaire $e^{-j\gamma z}$ est le facteur de phase (variation de la phase en fonction de $z$). Plus la fréquence est grande, plus l'atténuation est importante. Pour des fréquences élevées, la pénétration des courants de Foucault est très faible, c'est l'*effet de peau*. Sur le plan pratique, à titre d'exemple, les épaisseurs d'acier inoxydable qui peuvent être explorées efficacement par courants de Foucault sont :

| | |
|---|---|
| à 1 kHz | e = 13,5 mm |
| à 50 kHz | e = 1,9 mm |
| à 300 kHz | e = 0,78 mm |

Le calcul théorique qui donne le comportement des courants de Foucault dans le cas général est très complexe. Il est en revanche assez simple dans le cas de conducteurs cylindriques (barres ou tubes) entourés par la bobine. Dans ce cas, le docteur Förster a défini une valeur caractéristique, homogène à une fréquence, du matériau à contrôler :

$$f_g = \frac{1}{2\pi\sigma\mu a^2}$$

où $\sigma$ est la conductibilité électrique, $\mu$ la perméabilité magnétique et $a$ le diamètre extérieur.

La connaissance de $f_g$ pour le matériau à tester va permettre de définir la fréquence de travail pour répondre au problème posé.

On peut montrer que l'influence du défaut sur la variation d'impédance de la bobine sera plus ou moins prépondérante selon la fréquence du courant circulant dans la bobine. Le choix de la fréquence est donc essentiel pour la mise en œuvre du contrôle par courants de Foucault.

### Principe des appareils

Les appareils de contrôle non destructif sont devenus depuis quelques années, avec le développement de la technologie dans le domaine de l'électronique, de plus en plus sophistiqués, mais ils reposent tous sur le même schéma de principe : un oscillateur, un système de mesure (bobine), un système d'analyse et un ensemble d'exploitation (*fig.* 48). L'oscillateur fournit la tension sinusoïdale de référence. Le système de mesure se présente soit comme un point de mesure dont la bobine est une des branches, soit comme un circuit magnétique à enroulements multiples (*fig.* 49). Le capteur peut être constitué soit d'une bobine unique, soit de deux éléments à fonctions séparées. La forme dépend essentiellement de la géométrie de l'objet examiné.

Le système d'analyse utilise l'une des techniques suivantes : analyse d'impédance et d'amplitude ; analyse de phase et d'amplitude ; analyse de modulation.

La deuxième technique permet de différencier les divers types de discontinuités en observant les variations de phase induites. L'analyse de modulation complète la méthode d'analyse de phase en ce qui concerne le tri des défauts.

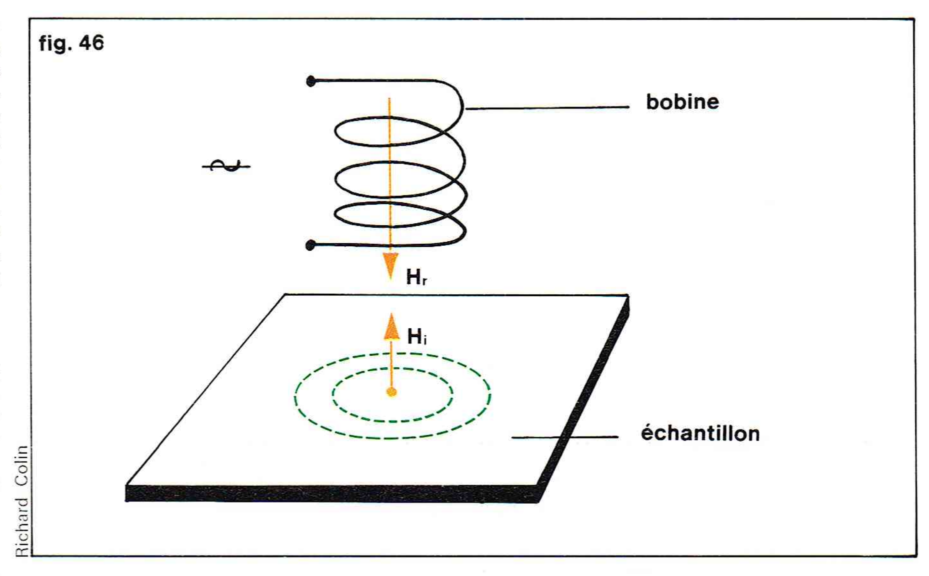
### Utilisation des courants de Foucault au contrôle non destructif

Les progrès importants réalisés ces dernières années dans la mise au point des matériels et la connaissance des phénomènes mis en jeu ont permis à cette méthode, qui offre l'avantage de ne pas nécessiter de contact avec la pièce testée et d'avoir un temps de réponse très bref, de se répandre de plus en plus dans l'industrie, en particulier pour le contrôle des tubes, des barres et des fils métalliques.

## *Contrôle non destructif par magnétoscopie*

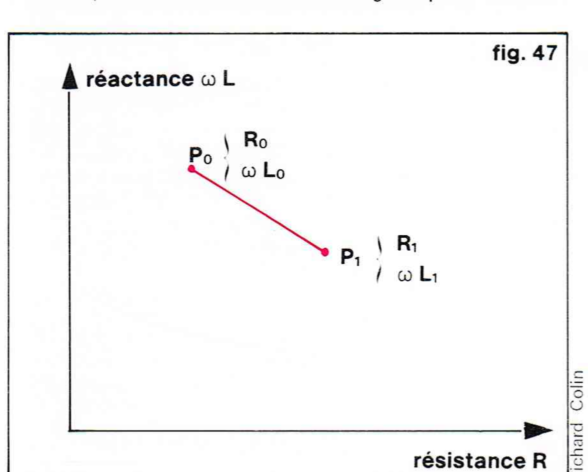
### Principe

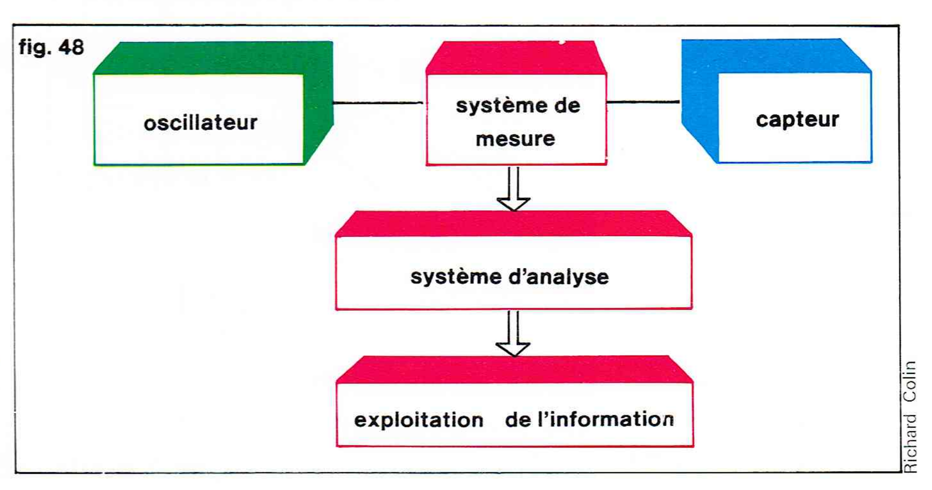
Dans une pièce constituée d'un matériau magnétique aimanté au voisinage de la saturation, les lignes de forces associées au champ magnétique sont déformées par une discontinuité débouchant en surface au voisinage immédiat de cette dernière (*fig.* 50). La mise en évidence de ces anomalies se fait en observant la répartition d'une poudre magnétique sur la surface de la pièce. Les particules ont tendance à s'accumuler près des défauts.

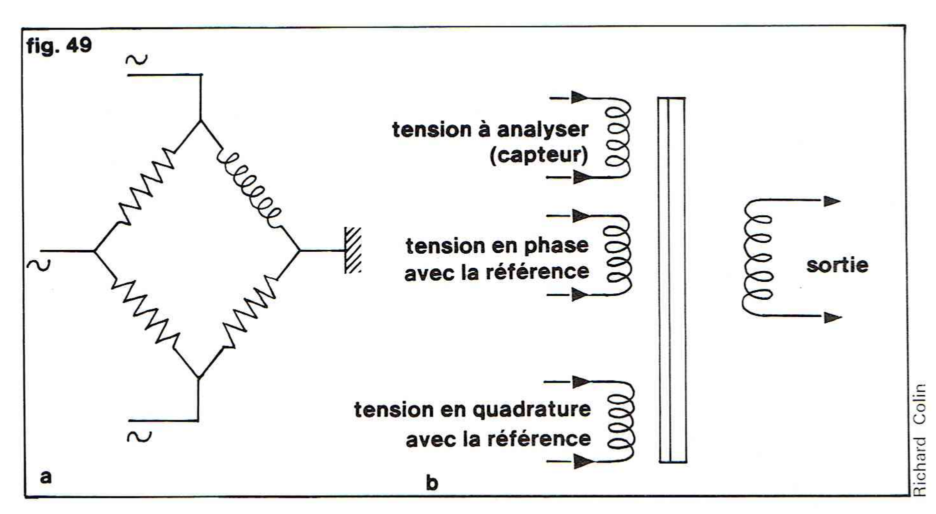



▲ ***Figure 46 : schéma de principe de la détection d'un défaut dans une pièce par la méthode des courants de Foucault.***

▼ ***Figure 47 : plan d'impédance pour la détection des défauts dans une pièce par la méthode des courants de Foucault (voir développement dans le texte).***
***Figure 48 : schéma synoptique d'un appareil à courants de Foucault.***






▲ *Figure 49 : systèmes de mesure des appareils à courants de Foucault ; a, montage en pont équilibré ; b, circuit magnétique à enroulements multiples.*

ou qui n'ont pas encore connu le développement industriel des méthodes classiques.

### Mise en œuvre de la magnétoscopie

La première étape consiste à magnétiser l'objet que l'on veut contrôler. Selon les dimensions et la géométrie de celui-ci, on emploie des appareils fixes ou mobiles. Dans tous les cas, la pièce est serrée entre deux masses polaires qui créent un champ magnétique suivant l'axe qui les relie. On détectera uniquement les défauts perpendiculaires au champ magnétique, ceux qui sont parallèles aux lignes de forces n'introduisant pas de modifications notables. Par conséquent, il est souvent nécessaire de créer un champ perpendiculaire au premier pour déceler les anomalies d'orientations différentes.

La poudre magnétique est déposée soit par pulvérisation, soit par application d'un liquide où les particules sont en suspension. L'examen est souvent facilité par l'usage de produits fluorescents.

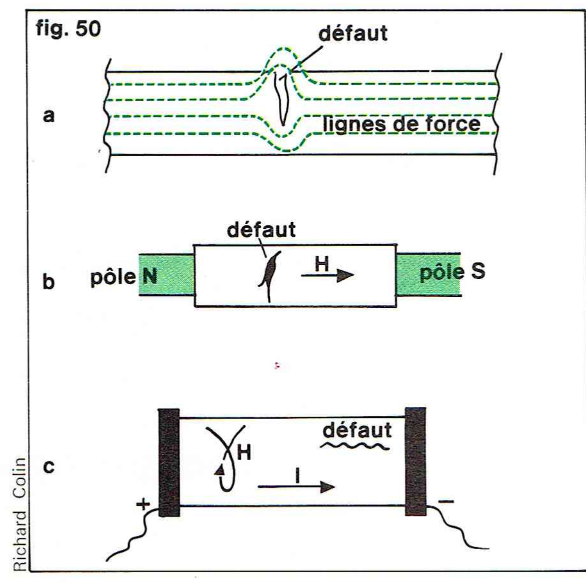
### Possibilités et limites de la magnétoscopie

La magnétoscopie est une méthode très simple, peu coûteuse, qui est couramment employée dans l'industrie pour le contrôle de pièces de géométrie simple (arbres, barres laminées, etc.), pour l'examen de soudures, etc. C'est, comme le ressuage, une technique sensible aux défauts débouchant en surface mais qui permet de déceler des défauts situés à une profondeur qui peut aller jusqu'à 10 à 15 mm.

Ce procédé est limité bien entendu aux matériaux magnétiques. De plus, comme le ressuage, il ne donne pas d'indications quantitatives précises sur les défauts décelés.

## *Méthodes diverses*

Nous passerons en revue dans ce chapitre des techniques dont les domaines d'application sont plus restreints




▶ *Figure 50 : détection des défauts d'une pièce par magnétoscopie ; a, répartition des lignes de force dans un matériau magnétique ; b, appareil fixe à pôles ; c, appareil fixe à circulation de courant.*

### Émission acoustique

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte et qu'il se produit en son sein une transformation irréversible, il émet des ondes élastiques, de très faible amplitude en général, qui peuvent être détectées par un dispositif approprié. C'est ce qu'on appelle l'*émission acoustique*.

L'apparition et la propagation d'un défaut dans une structure correspondent bien à une transformation irréversible et donnent donc lieu à émission acoustique, mais ce ne sont pas les seules sources possibles : la déformation plastique, la transformation martensitique par exemple produisent aussi des ondes de contrainte.

Contrairement à l'ensemble des méthodes que nous avons étudiées dans ce qui précède, l'émission acoustique ne décèle que ce qui évolue au sein du matériau : c'est une méthode « active », par opposition aux méthodes « passives ». On voit donc l'intérêt de cette technique qui permet de surveiller l'état d'une structure pendant son utilisation.

Les signaux mécaniques sont recueillis par des capteurs piézo-électriques, fonctionnant généralement à leur résonance, semblables aux transducteurs ultrasonores ; ils sont ensuite amplifiés puis analysés. A l'heure actuelle, on ne sait pas relier les caractéristiques des ondes à la source émissive, donc à la nature du défaut, mais on a pu mettre en évidence la relation entre la densité de l'émission et le caractère de gravité de la progression du défaut. De plus, en disposant sur la pièce observée plusieurs capteurs et en mesurant les différences de temps d'arrivée d'un même signal à ces divers transducteurs, il est possible, par triangulation, de déterminer la position du défaut.

L'émission acoustique est actuellement employée pour l'examen en service de certaines structures (cuve de réacteur nucléaire, réacteur de pétrochimie, etc.). De nombreuses études sont actuellement en cours en France et à l'étranger pour améliorer la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu ainsi que pour mettre au point des méthodes d'analyse qui permettent de tirer des informations qualitatives et quantitatives plus précises sur la nature des sources détectées, donc sur la nature des défauts qui se propagent.

### Méthodes thermiques

Ces méthodes utilisent le fait qu'au sein d'un matériau une discontinuité perturbe la propagation d'un flux de chaleur. Le principe en est très simple : on chauffe une surface de la pièce à examiner et on relève la répartition des températures sur la face opposée. L'hétérogénéité éventuellement présente dans la pièce donne lieu à une anomalie de température.

La carte thermique est relevée soit grâce à un détecteur sensible au rayonnement infrarouge émis par la surface observée, soit par la variation de coloration de cristaux liquides (substances qui ont une structure analogue à celle des matériaux cristallins, laquelle se modifie en fonction de la température).

Ces techniques sont employées pour le contrôle de la qualité des collages, des soudures et de structures composites.

### Autres méthodes

Il faudrait pour être complet citer : l'analyse des modes de vibrations d'une pièce qui donne des indications sur l'existence éventuelle de défauts ; les méthodes utilisant les variations de résistivité d'un matériau (techniques employées lors d'un essai de fatigue pour suivre la progression de la fissure), les techniques holographiques, etc. Toutes ces méthodes et bien d'autres sont employées soit au laboratoire, soit dans l'industrie pour résoudre des problèmes de contrôle particuliers.

## BIBLIOGRAPHIE

CHRÉTIEN J.-F., *Cours de contrôle non destructif*, U. T. C. - PIGNET J.-L., *Méthodes non destructives pour l'étude et le contrôle des matériaux*, Éditions de la *Revue d'optique*, 1957. - *Initiation à la radiographie industrielle*, Kodak Pathé. - *Non Destructive Testing Handbook*, Edited by R. C. Mc Master, Ronald Press Company.

# INFORMATIQUE

## Histoire de l'ordinateur

C'est avec l'invention de la notation indo-arabe que débute le calcul numérique. Dans la plus haute antiquité, les Indiens, les Incas, les Babyloniens, les Grecs et les Romains utilisaient des abaques. L'emploi de galets pour garder la trace de l'information est indiqué dans l'étymologie du mot *calcul* provenant de *calcis* (calcaire) et *calculus* (petit morceau de caillou dont on se sert pour compter). Les Grecs appelaient *abax* la pierre plate sur laquelle ils disposaient les cailloux, ce qui a donné le mot *abaque* en français.

Les abaques furent progressivement remplacés par les bouliers, utilisés en Chine à partir du Vᵉ siècle avant Jésus-Christ. Les bergers du Pérou utilisaient, eux, un *quipu*, longue cordelette nouée, pour compter leurs troupeaux. Grâce aux fils attachés à la cordelette, teintés de couleurs différentes, entrelacés en des nœuds variés selon des règles à signification précise, le berger pouvait compter et mémoriser certaines informations.

Vers l'an 825, Abu Abdallah Muh Ibn Musa Al Khwarizmi écrit les fondements d'une arithmétique. Celle-ci sera traduite en latin vers le XIIᵉ siècle. Du nom de son auteur dérive le mot *algorithme*, très utilisé en informatique moderne.

Il faut attendre 1617 pour que le mathématicien écossais John Napier, qui invente les logarithmes et rend systématique l'utilisation du point décimal pour séparer la partie fractionnaire de la partie entière d'un nombre, montre comment effectuer de façon automatique les multiplications et les divisions.

En 1642, pour aider son père, intendant des Finances, Blaise Pascal conçoit une machine à additionner utilisant un système de roues dentées. Chaque roue comporte dix positions marquant les chiffres de 0 à 9 et un ergot. Celui-ci avance automatiquement la roue immédiatement à gauche, chaque fois que la roue concernée passe de 9 à 0. Ce principe permet la propagation des retenues. La soustraction est rendue possible par une méthode analogue.

En 1671, Leibniz améliore la machine de Pascal, en la dotant de la multiplication et de la possibilité d'extraire les racines carrées. La multiplication est faite par additions successives. (Les ordinateurs modernes utilisent encore un dispositif analogue.) L'ensemble des travaux de Leibniz fait progresser la rigueur dans la science mathématique. Il entreprend une synthétisation en créant un langage universel de formalisation et une algèbre de raisonnement. Il montre les avantages de la numération binaire par rapport à la numération décimale dans les automatismes.

Comme Jacquard au XVIIᵉ siècle, Basile Bouchon, au début du XVIIIᵉ, s'inspirant des orgues de Barbarie commandées par des cylindres à pivots, schématise une




Archives Snark

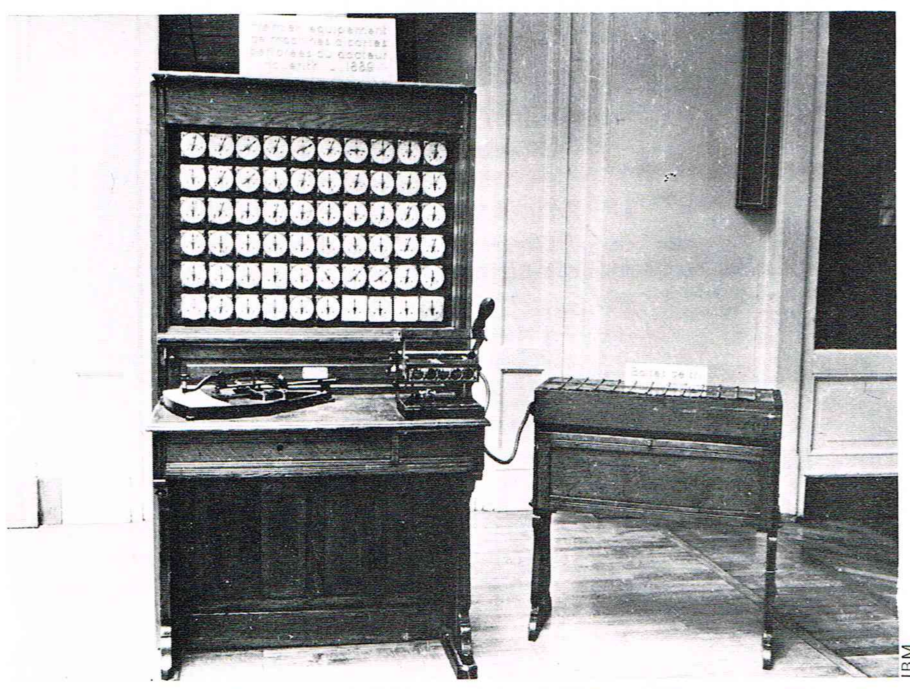
▲ Document ancien représentant un Péruvien muni d'un quipu, ensemble de cordelettes permettant de compter les troupeaux (Bibliothèque nationale, Paris).



Archives Snark

◀ La machine à calculer conçue en 1642 par Pascal pour aider son père qui était intendant des Finances (Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris).

IBM



IBM

▲ *En haut, la machine analytique de Charles Babbage (1792-1871). Ci-dessus, une des machines électromécaniques à calculer de Hollerith (1860-1929) ; elle utilisait des cartes perforées selon un code dit* **code Hollerith** *; les résultats étaient restitués en langage clair (1882).*

▼ *Le calculateur électronique MARK I conçu et construit par Aiken et IBM en 1942-1943 ; cette machine longue de 15 m, large de 2,4 m pouvait effectuer des additions, soustractions, multiplications et divisions.*

commande des fils de chaîne d'un métier à tisser par l'intermédiaire d'une carte perforée.

C'est à partir de bandes perforées, ou d'autres mécanismes ingénieux d'engrenages, de cames d'entraînement divers, que Jacques de Vaucanson réalise de célèbres automates.

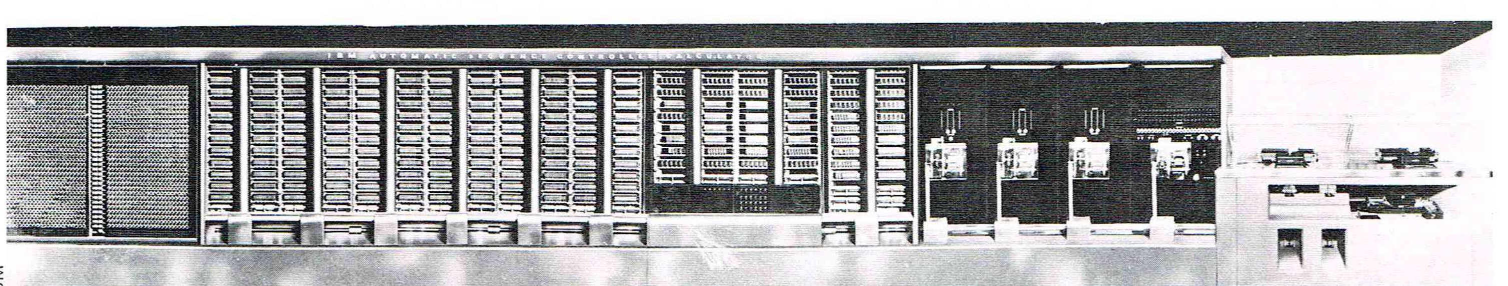
Puis Charles Babbage, en 1833, marie les innovations de Jacquard et de Pascal et propose sa machine analytique : *analytical engine*. Il pense qu'il est inutile d'augmenter les performances des machines mécaniques, tant que les opérations ne peuvent être enchaînées de façon automatique. Pour cela, il invente une machine utilisant deux jeux de cartes perforées : l'un contient les données à traiter, l'autre la suite des opérations à effectuer ; l'automate lit la commande, l'exécute, et continue en lisant la commande suivante. Cette machine ne fut en fait jamais réalisée pratiquement, à cause du retard de la technologie du moment sur les idées de Babbage. Cependant, les derniers plans retrouvés montrent une structure logique très peu différente de celle des calculateurs d'aujourd'hui. La machine se compose de trois parties : une mémoire pouvant contenir mille mots de cinquante positions binaires, un organe de calcul et une unité de commande. Babbage fut aidé dans ses travaux par lady Lovelace, fille de lord Byron, qui écrivit toute une série de programmes pour ces machines. Babbage est également connu pour deux progrès importants : le transfert conditionnel permet à la machine de ne pas exécuter obligatoirement les instructions qui suivent lorsque certaines conditions sont réalisées dans les traitements précédents ; la machine peut modifier les nombres et les instructions qu'elle possède en mémoire. Il lance également les idées de programme enregistré, de sous-programme, qui ne seront utilisées que vers 1940. Il reconnaît enfin l'importance de l'impression des résultats, et l'utilité des organes d'entrées-sorties.

Pendant ce temps, des mathématiciens, comme Gauss, créent des méthodes mathématiques qui vont se trouver adaptées aux machines à calculer. Boole et de Morgan édifient les fondements de la logique moderne.

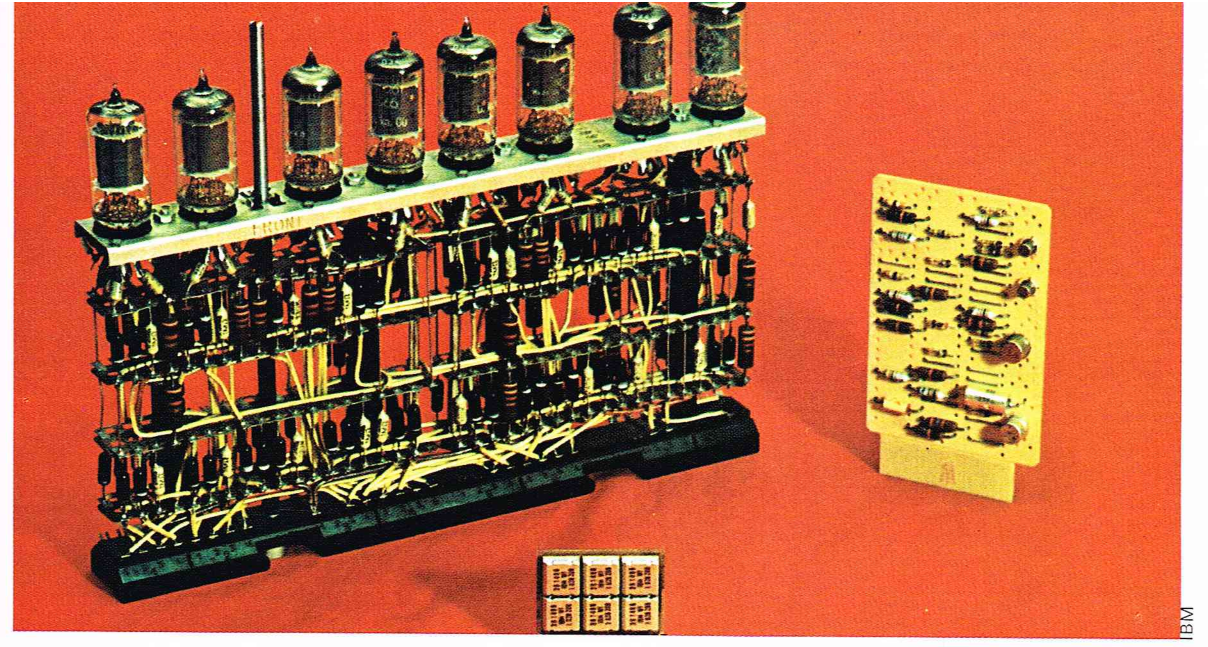
Barbour imagine en 1870 le premier dispositif d'impression de chiffres sur papier à partir de la machine. Vers 1875, Boudot invente les premiers codes opérationnels binaires permettant une transmission plus rapide en télégraphique électrique ; ces codes sont encore en usage à l'heure actuelle. En 1885, Hollerith réalise la première machine électromécanique fonctionnant réellement. Utilisant un principe analogue à celle de Babbage, mais moins complexe cependant, elle travaille à partir de cartes perforées. Ces cartes sont encore un support privilégié des informations, et le code utilisé pour y représenter les données s'appelle *code Hollerith*.

C'est en 1936 que Turing formule une définition des machines automatiques et élabore le modèle mathématique d'un calculateur universel capable d'effectuer tous les traitements exécutables par une machine automatique. L'influence des automates de Turing se fait sentir dans la théorie des langages ; les grammaires formelles utilisent ces concepts. En 1951, Markov systématise le concept d'algorithme. Quelques années plus tard, Detlovsk définit les fonctions récursives et calculables. Les travaux théoriques permettront la conception de grammaires, langages et compilateurs.

Cependant, de 1936 à 1939, les Américains Howard Aiken et Georges Stibitz mettent au point un calculateur automatique fonctionnant avec des relais mécaniques. Ils réalisent les idées de Babbage sur le calcul automatique, tant pour le stockage mécanique des informations que pour les instructions permettant la rupture de séquence



IBM


IBM

◀ *Évolution des technologies utilisées en informatique : en haut à gauche, la première génération avec l'emploi des tubes ; en haut à droite, la deuxième génération avec l'utilisation des cartes transistorisées (circuits imprimés) ; au milieu, la troisième génération avec les cartes assemblages de micromodules (circuits intégrés) ; tout en bas, la quatrième génération avec les cartes micromodules et microplaquettes de silicium (circuits monolithiques) ; on peut observer la miniaturisation progressive des composants.*

conditionnelle des instructions. Le calculateur électronique MARK I a été conçu et construit par Aiken avec l'aide d'IBM, le plus important des constructeurs d'ordinateurs actuels. Cette machine de 15 m de long et 2,4 m de large était capable d'effectuer les additions, soustractions, multiplications et divisions ; elle faisait référence à des tables. Les entrées étaient faites à partir de cartes perforées. Les résultats étaient édités sur imprimante ou sur cartes perforées. L'ENIAC (Electronic Numerical Integration and Calculator) est construite en 1944 par Eckert et Mauchly à la Moore School de l'université de Pennsylvanie pour effectuer des calculs de tables balistiques. Mille fois plus rapide que la machine précédente, elle est constituée de 18 000 tubes électroniques, dissipe 150 kW et pèse trente tonnes. A titre de comparaison, une machine à calculer actuelle de même puissance, HP 55, mesure quelques centimètres de long, tient dans la poche et pèse une centaine de grammes.

A partir de 1957, von Neumann, qui avait travaillé avec l'équipe précédente à la construction d'ENIAC, développe une méthode pour convertir le principe de programme externe en programme enregistré. Les machines possèdent déjà des mémoires permettant de conserver des résultats partiels réutilisables ; von Neumann a l'idée de s'en servir pour enregistrer les séquences d'instructions. Pour exécuter un programme, la machine doit commencer par introduire le programme dans la mémoire avant de lancer l'exécution des opérations. Ce progrès permet de ne plus avoir recours à une opération manuelle lors d'une série de décision. A partir de la valeur calculée d'une expression, la machine exécute telle ou telle partie de programme, tel traitement spécial.

A partir de 1946, plusieurs machines ont été élaborées à partir de ces principes. Après l'EDVAC, Goldstine et von Neumann créent l'IAS, ou machine de Princetown, caractérisée par son arithmétique parallèle et sa programmation à une seule adresse. Le Whirlwind 1 du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a fonctionné tout d'abord avec des mémoires électrostatiques, puis a reçu des mémoires magnétiques. Plus tard, Williams invente une nouvelle mémoire : le tube à rayon cathodique.

Dès lors, l'informatique est sortie de sa préhistoire et entre dans une phase de développement rapide que nous verrons plus en détail dans les chapitres suivants.

## *Évolution de la technologie des ordinateurs*

L'évolution des différentes technologies utilisées en informatique s'est faite en quatre temps.

La **première génération** correspond à l'emploi de *tubes électroniques* de types diode et triode et de *tambours magnétiques* comme supports de mémoires. Elle correspond à l'apparition des machines à programme enregistré, supplantant les machines à relais, programmés à partir de tableaux de connexion à la manière des standards téléphoniques. Ces machines étaient encore très encombrantes et consommaient beaucoup d'énergie. A leurs débuts, elles n'eurent guère de succès, car elles coûtaient très cher et étaient peu puissantes. Leur intérêt s'accrut quand apparut la possibilité d'enregistrer les fichiers sur des organes externes autres que les cartes perforées ; en effet, les gros fichiers utilisés dans les entreprises prennent une place considérable et sont difficiles à manipuler s'ils sont conservés sur ce support. L'avènement des *bandes magnétiques,* plus souples et permettant une meilleure utilisation du volume disponible, a favorisé l'essor de l'informatique naissante. Comme les opérations de lecture-écriture étaient ainsi plus rapides, il fallut augmenter les performances des machines.

L'apparition des *transistors* et des *circuits imprimés* inaugure la **seconde génération** d'ordinateurs. Un transistor est un petit parallélépipède de silicium de moins d'un centimètre de côté et de 150 microns d'épaisseur. Les transistors sont montés dans des boîtiers et sont assemblés avec les autres composants sur des plaquettes de quelques dizaines de centimètres de côté. L'intérêt de cette évolution est double. Le volume et la consommation énergétique des machines diminuent considérablement. De plus, la fiabilité des calculateurs est grandement améliorée.

Une évolution s'est produite en même temps dans un autre domaine : le *software* ou *logiciel.* Les langages évolués se développent, rendant l'usage de la machine plus aisé pour l'homme. L'utilisation des disques magnétiques et des bandes magnétiques se généralise. Toutefois, les entreprises n'emploient encore l'ordinateur que comme une machine comptable perfectionnée.

Les ordinateurs de la **troisième génération** se répandent vers 1964. Ils révolutionnent la conception du traitement de l'information. La technologie de *miniaturisation* des circuits améliore les performances de l'unité centrale. Les *circuits intégrés* remplacent les transistors. Sur un circuit intégré de la taille d'un transistor, on peut loger des dizaines de composants élémentaires. Le développement des canaux et d'accessoires intermédiaires entre l'unité centrale et les périphériques améliore les performances de l'ensemble. La carte perforée marque le pas devant une grande variété de périphériques et de moyens de saisie de l'information. L'emploi généralisé de mémoires à accès aléatoire (disques) permet le travail simultané sur plusieurs fichiers, donc une plus grande souplesse de programmation. Parallèlement, le développement du logiciel se poursuit. Des langages évolués très puissants sont créés. Des sytèmes d'exploitation plus souples et mieux adaptés contribuent à une meilleure utilisation de l'ordinateur. Le *traitement à distance* de données (ou télétraitement) apparait à cette époque.

La **quatrième génération** fait son apparition vers 1970. Il ne s'agit pas d'une révolution, mais d'un tournant de l'histoire de l'informatique. Le logiciel reste celui de la génération précédente. La technologie de miniaturisation permet la mise en œuvre de *circuits monolithiques.* Ces circuits sont réalisés à partir d'une plaquette d'un métal conducteur du type silicium. Les diodes, les transistors et les autres composants élémentaires sont réalisés par l'introduction judicieuse de différentes impuretés. Ces circuits sont utilisés pour faire des mémoires et des unités centrales. Leur faible coût et la possibilité de programmer ces circuits monolithiques ouvrent un champ d'applications immense à la micro-informatique. Une tendance se dessine, remplaçant l'informatique centralisée à l'aide d'une seule grosse machine par une informatique répartie, permettant des traitements locaux sur de petits ordinateurs à faible prix de revient.

IBM

▲ *Vue d'ensemble de l'ordinateur IBM 370 modèle 158, ordinateur de la quatrième génération bénéficiant de la technologie avancée des circuits monolithiques. On peut reconnaître les différentes parties de l'ordinateur : 1, unité et mémoire centrales ; 2, console maîtresse à écran et imprimante de l'opérateur ; 3, unité de contrôle de communications ; 4, dérouleur de bandes magnétiques ; 5, unité de disques à têtes fixes ; 6, unité de disques mobiles ; 7, lecteur de cartes ; 8, perforateur de cartes ; 9, écran cathodique ; 10 et 11, imprimantes.*

## Structure d'un calculateur

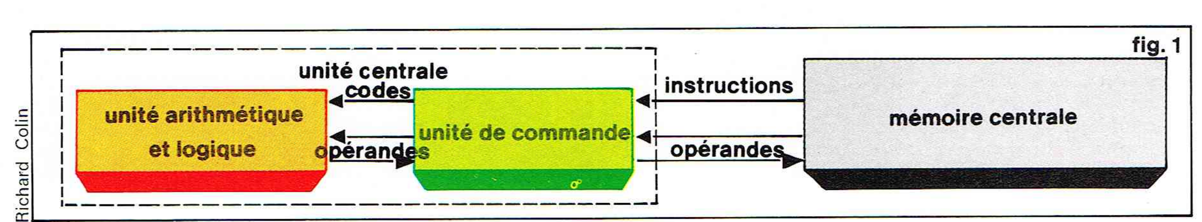
### Présentation générale

Selon leur constructeur et leur utilisation, les ordinateurs possèdent des apparences très différentes. L'immense machine, dans une salle entièrement climatisée, entourée de l'armée de ses *périphériques*, fait de la gestion toute la journée. Une équipe d'opérateurs spécialisés lui communique des masses d'informations sous forme de cartes perforées, de bandes magnétiques. Les imprimantes rapides crachent leurs flots de factures, bordereaux et états divers. A l'opposé, un petit calculateur, isolé dans un coin d'un atelier, régit, sans défaillance, le procédé industriel qu'il est chargé de surveiller, écrivant de temps à autre un compte rendu de l'état de la manipulation. Ses sens sont des thermocouples, des manomètres ou d'autres appareils de mesure.

Sous leurs divers aspects, les ordinateurs ont en commun une structure interne analogue. Leur mémoire centrale contient les instructions à exécuter et les informations qu'ils seront chargés de manipuler. L'unité centrale est chargée de coordonner les différentes actions de la machine ; c'est elle qui sait compter, prendre les décisions. Les communications avec le monde extérieur se font par l'intermédiaire des unités d'échange (ou d'entrées-sorties) ; chacune de ces unités est spécialisée pour pouvoir prendre en compte les informations que lui délivre l'appareil qui lui est attaché, le périphérique.

La *mémoire centrale* se comporte, d'un point de vue logique, comme une commode possédant de nombreux tiroirs. Chacun de ces tiroirs, ou mots, contient une information qui peut être ou bien une instruction pour la machine, ou bien une donnée destinée à être traitée. La taille d'un ordinateur est évaluée à partir du nombre de ces mots. Les petites machines possèdent en général au moins 4 000 mots, les plus grosses en ayant plusieurs millions.

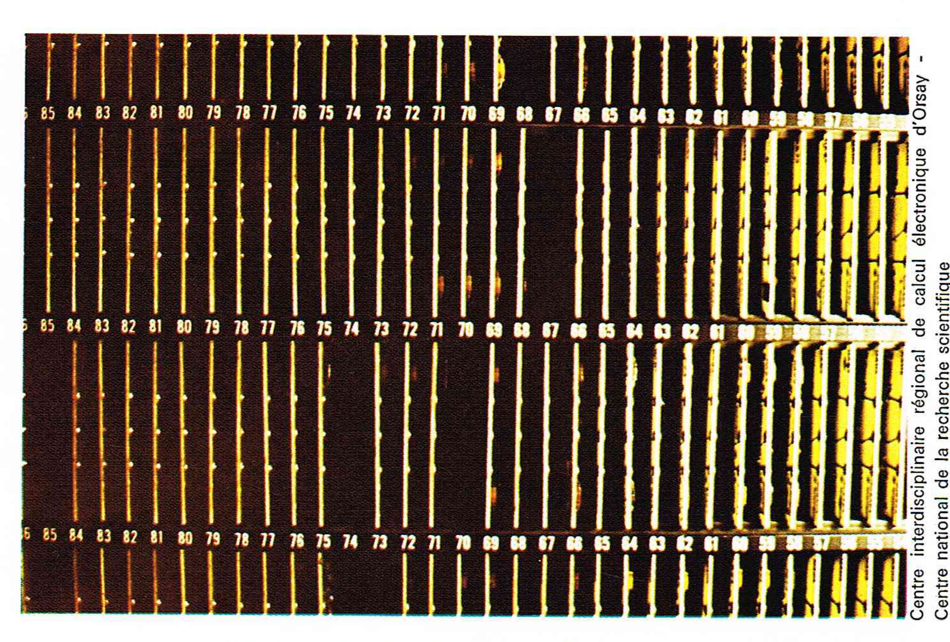
L'*unité centrale* se décompose en deux organes principaux : l'unité de commande et l'unité arithmétique et logique. Cette dernière est capable d'effectuer très vite une grande variété d'opérations (arithmétiques ou logiques). Il est cependant nécessaire de lui désigner l'instruction à exécuter ainsi que les opérandes. C'est l'unité de commande qui est chargée de ces fonctions. Elle lit dans la mémoire centrale l'ordre et les données et les transmet. Éventuellement, elle range le résultat obtenu dans le mot qui doit le contenir. On obtient alors le schéma de la *figure* 1.




▶ *Figure 1 : schéma synoptique de la mémoire centrale et de l'unité centrale d'un ordinateur.*

Ainsi définie, la machine est capable d'exécuter un programme préalablement rangé dans sa mémoire et de traiter les informations qui y sont enregistrées. Cependant, sa puissance est très limitée. C'est pourquoi elle dispose en plus d'*unités d'échange* ayant deux fonctions principales. La première consiste à augmenter la taille de stockage disponible par la gestion de liaison avec des mémoires auxiliaires (disques, bandes magnétiques, feuillets, etc.) dont la capacité est très supérieure à celle de la mémoire centrale. Cependant, le temps d'accès à l'information est augmenté. La seconde fonction des unités d'échange est de permettre une communication avec le monde extérieur et, en particulier, avec l'être humain. C'est par elles que transiteront les informations lues sur des cartes perforées et les lignes à imprimer.

A la lumière de ce qui précède, un ordinateur peut être défini comme étant constitué de plusieurs unités coopérant dans le dessein d'exécuter le programme contenu dans la mémoire centrale. L'unité de commande contrôle l'exécution des instructions correspondantes. Elle active l'unité arithmétique et logique ou une unité d'échange, suivant qu'il s'agit d'une opération de calcul ou d'un transfert d'information. Dans les chapitres suivants, nous détaillerons plus particulièrement le rôle de chacun de ces composants.



Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Carte des circuits logiques d'un ordinateur CDC 3600.***

## *Les instructions de la machine*

### *Représentation des données*

Lorsque l'on écrit un nombre, par exemple 2 141, tout le monde comprend qu'il s'agit de représenter 1 unité plus 4 dizaines plus 1 centaine plus deux milliers. L'habitude et les conventions veulent que le chiffre de droite représente le nombre d'unités, le suivant le nombre de dizaines, plus le nombre de dizaines de dizaines, etc. ; on peut voir ainsi le rôle important de la dizaine : on dira que l'on compte en base dix. Dans ce cas, il est nécessaire, pour écrire les nombres, de disposer d'un alphabet de dix symboles qui sont les chiffres de 0 à 9. Avec la technologie actuelle, il est plus facile de coder deux symboles seulement, c'est pourquoi, dans la machine, on ne disposera que de deux chiffres : 0 et 1. Par exemple, 0 correspondra à une absence de courant électrique et 1 à sa présence. Les nombres que l'on écrira ne seront donc qu'une suite de 0 et de 1. Le chiffre de droite comptera les unités, le suivant le nombre de couples, puis le nombre de couples de couples, etc. Le nombre binaire 1101 sera l'équivalent du nombre décimal :

$$1 \times 1 + 0 \times 2 + 1 \times 2 \times 2 + 1 \times 2 \times 2 \times 2 = 13.$$

Un chiffre binaire s'appelle couramment *bit* (abréviation de *binary digit* qui signifie chiffre binaire). Le nombre 1011 s'écrit donc à l'aide de 4 bits. Les nombres manipulés par la machine, ainsi que le codage des instructions, consistent donc en une succession de 0 et de 1.

Le risque d'erreur et la difficulté de compréhension inhérents à ce code font que les programmeurs utilisent plus généralement deux autres systèmes de numération. Prenons par exemple un nombre binaire d'une longueur de 12 digits : 101001100010. Les adeptes du système octal liraient ce nombre par tranches de 3 bits. Or, à l'aide de 3 bits, il est possible de coder les chiffres allant de 000 à 111, soit 8 chiffres. Le système octal utilise la base 8, et les symboles utilisés sont les chiffres de 0 à 7. Le nombre donné en exemple s'écrirait donc dans ce système 5142, qui est plus facile à manipuler. Une deuxième manière de procéder consiste à regrouper les bits par paquets de 4. Il faut donc disposer de 16 symboles pour pouvoir les coder. On se servira alors des dix chiffres arabes et des lettres A à F. 0 correspondra à « 0000 », 1 à « 0001 », ..., et 9 à « 1001 », puis A à « 1010 », B à « 1011 », jusqu'à F mis pour « 1111 ».

Dans la mémoire centrale d'un calculateur, les bits sont regroupés en mots. La longueur d'un mot reste constante pour une machine donnée, mais elle varie d'un constructeur à l'autre et parfois même d'un modèle à l'autre. Ainsi, chez IBM, les séries 360 et 370 sont dotées de mots de 32 bits. Chez Digital Equipment, les mots du PDP8 ont une longueur de 12 bits, ceux du PDP11 de 16 et ceux du PDP20 de 36. Les machines de Control Data possèdent des mots de 60 bits et celles de Burroughs 55. Tout en conservant la structure du mot, certains ordinateurs ont des instructions permettant de travailler sur un octet, regroupement de 8 bits. Les mots des IBM 360 et 370 sont divisés en quatre octets adressables, et ceux du PDP11 en deux.

Les données manipulées par un ordinateur sont de trois types : il s'agit des nombres entiers, des nombres réels et des caractères. D'autres types plus compliqués existent (complexes, tableaux, structures), mais sont ramenés pour le traitement à ces catégories. Examinons les représentations qui leur correspondent.

Les *nombres entiers positifs* sont représentés en base binaire comme nous venons de le voir, en général sur un mot. Pour coder les nombres négatifs, il faut de plus indiquer le signe ; que l'on utilise ou non le codage par complémentation (à 1 ou à 2), l'entier relatif est défini du point de vue logique comme suit : 1 bit de signe plus le reste du mot pour coder la valeur absolue.

Les *nombres réels* sont codés en trois parties. Le bit de signe est toujours présent. Le reste du mot est séparé en la mantisse $m$ d'une part et l'exposant $e$ d'autre part. Le nombre codé se lira alors : signe $m \times 2^e$. Ainsi, 1 sera codé par : le signe plus, la mantisse 0,1 et l'exposant 1, et devra être lu comme : $+ 0{,}1 \times 2^1$ (0,1 en langage binaire représente la fraction 1/2; 0,01 représente 1/4, etc.).

En fait, l'exposant indique la position réelle de la virgule dans la mantisse et numérote le nombre de bits dont il faut la décaler pour avoir la valeur vraie. Ainsi, en décalant une fois 0,1, on obtient bien 1. Pour augmenter la précision des nombres manipulés, on peut coder la mantisse sur plusieurs mots. On a ainsi une double, triple précision. Certains ordinateurs disposent d'instructions permettant d'opérer en précision multiple. Quand ce n'est pas le cas, le programmeur doit écrire les modules permettant d'effectuer ces opérations. Les constructeurs fournissent en général ces modules avec la machine.

Certains ordinateurs ont aussi la possibilité de travailler à partir d'une autre nature de nombres, qui sont représentés en décimal codé binaire (BCD pour « Binary Coded Decimal »). Chaque chiffre est codé en quatre positions binaires, et les combinaisons restantes servent de signe ou sont des erreurs. Les opérations sont alors faites directement dans cette représentation ou après conversion en binaire naturel.

La manipulation de *caractères* se fait à partir de différents codages qui dépendent en grande part des périphériques utilisés. Ainsi, pour qu'une imprimante écrive le caractère « A », il faut que l'ordinateur lui envoie une séquence de bits qui représente par convention cette lettre. Les codes les plus couramment utilisés en machine sont : EBCDIC (« Extended Binary Coded Decimal Interchange Code ») et ASCII « American Standard Code for Information Interchange »). Le premier utilise 8 bits, le second 7 (et même 6 si l'on élimine les lettres minuscules). Le jeu de caractères qu'ils servent à décrire comporte à peu près 90 signes : 26 lettres majuscules et autant de minuscules, 10 chiffres et 25 symboles divers environ [+ — = <, > ( ), etc.].

▶ *Figure 2 : les quatre informations nécessaires à l'exécution d'une instruction de traitement dans un ordinateur.*

| code opération | adresse 1$^{er}$ opérande | adresse 2$^{e}$ opérande | adresse du résultat |
|---|---|---|---|

fig. 2

Richard Colin

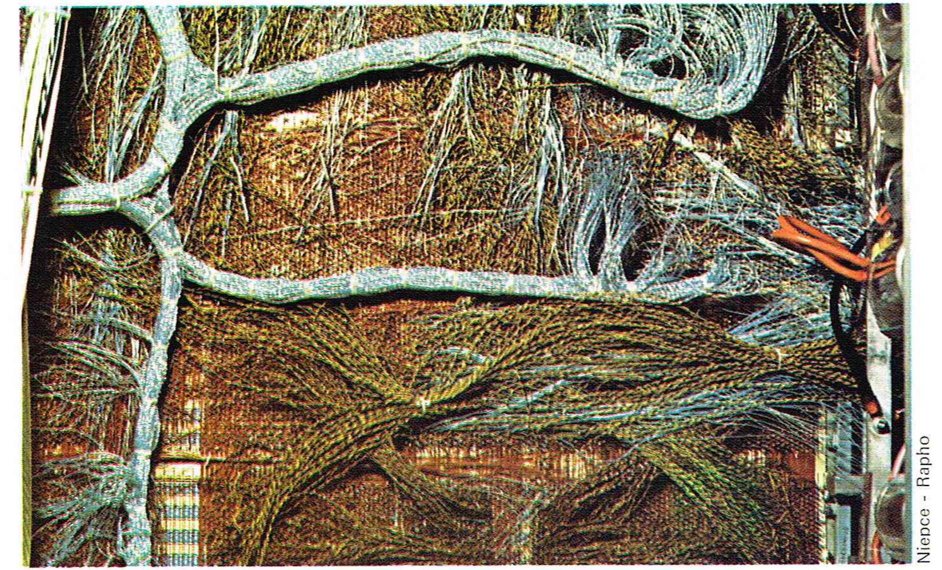
Dans les machines utilisant un code à 8 bits, la structure d'octets facilite le traitement de caractères (IBM, PDP11, etc.).

### *Les instructions et leur déroulement*

Parmi tous les mots de la mémoire, certains ont des propriétés particulières : ce sont les *registres*. Ils servent à repérer l'instruction à exécuter, à transférer les informations aux périphériques, ils servent d'indexation et sont le siège des opérations arithmétiques et logiques. Ils permettent aussi la communication de mémoire à mémoire. Lorsqu'ils cumulent ces fonctions, on les appelle registres banalisés. Actuellement, les opérations portant directement sur les mots de mémoire se développent et les privilèges des registres sont moindres.

Les mots de la mémoire centrale sont repérés par leur *adresse*, qui se trouve être un nombre binaire. Lorsque le calculateur a terminé l'exécution d'une instruction située dans la mémoire à l'adresse A, par exemple, il enchaîne ensuite par l'exécution de l'instruction située à l'adresse A + 1, sauf dans le cas d'une rupture de séquence. On peut distinguer trois grandes familles d'instructions : les instructions de traitement qui permettent les opérations arithmétiques et logiques de mémoire à mémoire et les mouvements ; les branchements, ou ruptures, qui sont utilisés pour indiquer que l'instruction à exécuter n'est pas la suivante en mémoire, mais doit être cherchée à l'adresse indiquée ; les instructions d'entrées-sorties qui permettent les échanges entre le calculateur et ses périphériques.

▼ *Deux illustrations de la complexité des câblages à l'intérieur d'un ordinateur ; la photo du haut montre le câblage de l'unité centrale d'un ordinateur UNIVAC.*



Niepce - Rapho



J. Ross - Rapho

Examinons tout d'abord une **instruction de traitement.** Pour être entièrement définie, elle nécessite quatre informations : le code de l'opération à effectuer, l'adresse du premier opérande, l'adresse du second et enfin l'adresse où stocker le résultat, comme on le voit *figure* 2. Le nombre total de bits nécessaire pour caractériser une instruction dépend donc du nombre d'opérations possibles et de la taille de la mémoire. Cependant, les trois adresses ne sont pas toujours précisées. Certaines machines considèrent implicitement que le résultat doit être rangé dans le second opérande. D'autres, ne disposant que d'un accumulateur, n'autorisent que les opérations entre ce registre et la mémoire et, dans ce cas, l'accumulateur jouera le rôle de second opérande et de résultat, il ne sera plus nécessaire que de préciser la seule adresse de l'opérande 1. La longueur d'une instruction machine peut être variable. En général, les machines à accumulateur ont une longueur d'instruction constante, ainsi que les machines à mots très longs.

Comment s'exécute une instruction de traitement ? Dans l'unité de commande existe un registre nommé *compteur de programme* qui sert à viser constamment l'instruction à exécuter. Pour illustrer le raisonnement qui va suivre, nous allons créer une machine disposant d'un ensemble de 16 instructions possibles et d'une mémoire centrale de 16 mots de 4 bits. (Un tel calculateur aurait un intérêt bien faible !) Nous utiliserons la symbolisation hexadécimale (ou à base 16) qui caractérise un paquet de 4 bits par un seul symbole. Supposons qu'au moment d'exécuter l'instruction, le compteur de programme contienne 2. Nous allons chercher l'ordre à exécuter dans la cellule mémoire d'adresse 2. Imaginons que les mots de la mémoire qui nous intéressent contiennent

2 3 4 5 . . . A B C

1 A B C . . . 3 1 0

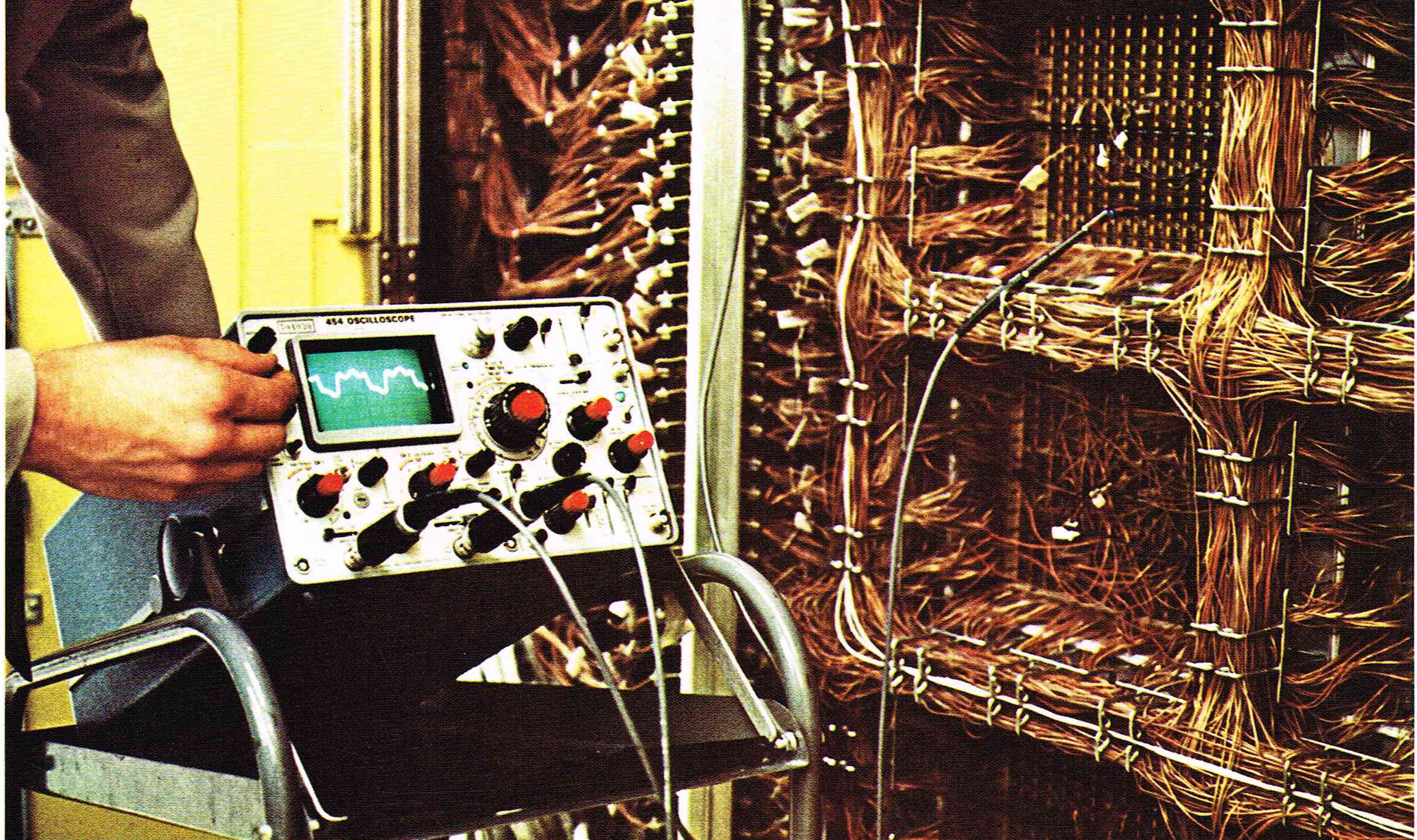
L'unité de commande va tout d'abord lire le contenu de l'adresse 2. La valeur 1 qui s'y trouve est le code de l'opération d'addition dans notre machine. Cette opération nécessite trois adresses d'opérandes. L'unité de commande va donc explorer l'adresse 3 pour y trouver l'adresse de l'opérande numéro 1. Il s'agit ici de A. Alors, le contenu de l'adresse A va être lu à son tour et communiqué à l'unité arithmétique qui dispose maintenant de son premier opérande, ici 3. La même procédure est exécutée par l'unité de commande pour le second opérande, qui est à l'adresse B et qui vaut 1. L'unité de commande ordonne alors à l'unité arithmétique d'effectuer l'addition de 3 et de 1. Celle-ci rend le résultat : 4. L'unité de commande va alors lire l'adresse de l'opérande numéro 3, à l'adresse 5, et trouve C. Le résultat obtenu 4 sera donc stocké à cet endroit, et la valeur 0 qui s'y trouvait sera définitivement perdue. Après cette instruction, le compteur de programme, qui a servi successivement à repérer les cases mémoire 2, 3, 4 et 5 au cours des différentes lectures en mémoire, contiendra la valeur 6. C'est à cette adresse que l'unité de commande ira chercher l'instruction suivante et le processus décrit recommencera.

Étudions maintenant les **instructions de branchement.** La rupture de séquence consiste à indiquer à l'ordinateur que l'on ne veut pas exécuter l'instruction suivante, mais une autre dont on donne l'adresse. Si 7 est le code de l'instruction de *branchement inconditionnel,* et D l'adresse de l'exécution prochaine à exécuter, nous aurons alors, si le compteur de programme contient 6 :

. . 6 7 . .

. . 7 D . .

La procédure d'analyse et d'exécution de cette instruction sera comme suit. L'unité de commande ira lire en 6 le code de l'opération à effectuer, ici 7. L'adresse de l'opérande sera lue dans la cellule mémoire d'adresse 7 et sera




J. Bordas - Fotogram

▲ ***Contrôle des circuits d'un ordinateur sur un oscilloscope.***

déposée dans le compteur de programme. L'instruction est terminée. Le compteur contient maintenant D, c'est-à-dire que cette adresse sera celle de l'instruction suivante.

Mais il n'existe pas uniquement des branchements inconditionnels. Les ruptures de séquences peuvent être faites *sous conditions*. En règle générale, il existe dans un ordinateur plusieurs bits qui sont positionnés au cours des instructions. Ce peuvent être : un bit de signe, qui indique que la quantité que nous venons de manipuler était positive ou négative, un bit de nullité pour indiquer si elle était ou non nulle, un bit de débordement de capacité qui est positionné lorsque le résultat d'une opération dépasse la capacité de sa zone de stockage, un bit de retenue, un bit de lien. Ces informations dépendent de la machine, elles n'existent pas toujours : ainsi les bits de signe et de nullité sont remplacés sur les machines à accumulateur par le signe et la nullité de l'accumulateur lui-même. La procédure d'exécution est analogue à celle que nous venons de décrire, mais l'adresse D n'est changée dans le registre compteur que si la condition est réalisée. Ainsi, au lieu du branchement inconditionnel, on aurait pu avoir :

6 7

8 D

où 8 est le code de l'opération : « si nul aller là ». Dans ce cas, le résultat de l'opération précédente (addition de 3 + 1) ayant donné 4 non nul, le chargement de D dans le compteur de programme n'aurait pas eu lieu et c'est en 8 que l'unité de commande aurait cherché l'instruction suivante.

Il peut être aussi intéressant de conserver l'adresse de l'instruction qui suit au moment d'un branchement, ce qui permettra de revenir poursuivre la séquence d'instructions interrompue. Nous arrivons ainsi à la notion de *sous-programme*. Ici, l'adresse de retour est rangée dans un registre particulier réservé à cet effet, ou dans un registre banalisé ou encore dans une position mémoire bien définie. On reviendra reprendre le programme interrompu par une instruction spéciale référençant l'endroit où cette adresse de retour est stockée.

Nous ne passerons pas en revue toutes les instructions possibles d'un ordinateur, mais, parmi les deux catégories que nous venons de voir, les plus courantes sont :

— les opérations arithmétiques (+ — ×/) et logiques (ET, OU, OU exclusif, complémentation) ;

— les décalages de registres (à gauche ou à droite, ouverts ou fermés) ;

— les mouvements de mémoire à mémoire, de registre à mémoire et de registre à registre. Les branchements conditionnels se font sur les bits que nous venons de voir, bits qui sont positionnés par les instructions de traitement.

Il existe aussi différentes **méthodes d'adressage.** Celles-ci changent la façon dont l'unité de commande aura accès aux valeurs des opérandes. On peut citer : l'adressage direct, l'adressage immédiat, l'adressage indirect, l'indexation, l'indirection indexation, l'auto-incrémentation et l'autodécrémentation. (Il est bien évident que le code de l'instruction comporte les renseignements pour que l'unité centrale sache à quel mode d'adressage elle a affaire.)

L'*adressage direct* correspond à ce que nous venons de voir. Dans l'instruction, l'opérande est désigné par son adresse.

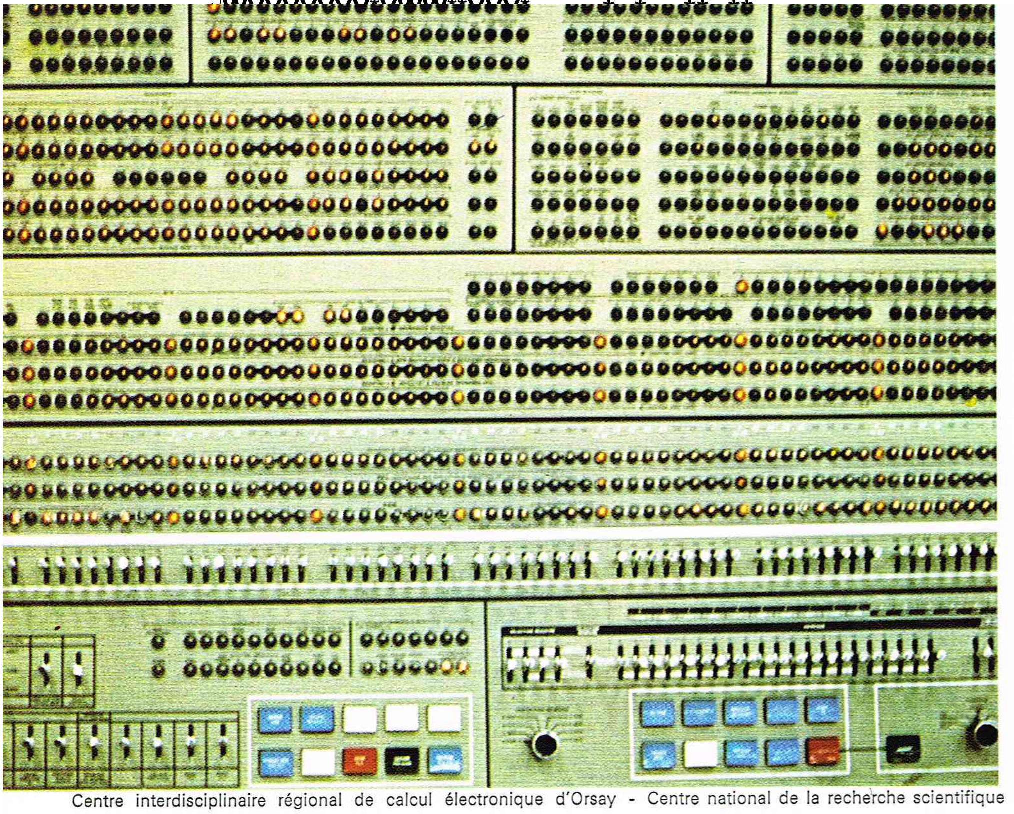
L'*adressage immédiat* sous-entend que, dans l'instruction, l'opérande est indiqué par sa valeur directement.

L'*adressage indirect* utilise la méthode inverse : l'adresse contenue dans l'instruction ne désigne pas l'opérande, mais une cellule de mémoire dans laquelle est rangée l'adresse de l'opérande. Cela permet, par programmation, de changer la valeur de la mémoire intermédiaire et donc d'opérer tantôt sur tel opérande, tantôt sur tel autre.

Chaque indirection nécessite une exploration supplémentaire d'une cellule mémoire et augmente ainsi le temps d'exécution effectif de l'instruction.

L'*adressage indexé* suppose l'existence d'un (ou plusieurs) registre d'index. L'adresse effective de l'opérande désigné s'obtient en ajoutant à l'adresse référencée dans l'instruction le contenu de ce registre. L'intérêt de ce mode est particulièrement grand dans la manipulation de tableau. En effet, on spécifie dans l'instruction l'adresse de début du tableau de valeurs, et l'élément recherché est obtenu directement après un calcul d'indice effectué dans le registre d'index.

L'indirection et l'indexation peuvent être combinées de deux façons : *indirection pré- ou postindexée*. Dans le premier cas, l'adresse référencée dans l'instruction plus le contenu de l'index désigne l'adresse de l'adresse réelle de l'opérande. Cette technique est utilisée pour manipuler des tables d'adresses. Dans le second cas, l'adresse référencée dans l'instruction désigne une cellule mémoire, au contenu de laquelle il est nécessaire d'ajouter l'index pour avoir l'adresse réelle de l'opérande. Si l'on désigne par des parenthèses « le contenu de », par X le contenu du registre d'index, et si l'on appelle A la valeur spécifiée dans l'instruction, la valeur réelle de l'opérande sera O telle que :



Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Le panneau de contrôle de l'ordinateur IBM 360/75 ; en haut, les voyants lumineux et en bas, les boutons et les clés permettant une intervention de l'opérateur.***

immédiat : O = A
indirect : O = (A)
indexé : O = (A + X)
indirect indexé : préindexation : O = ((A + X))
postindexation : O = ((A) + X)

Sur certaines machines existe aussi la possibilité d'*auto-incrémentation*, ou d'*autodécrémentation*. Dans ce cas, un numéro de registre est spécifié dans l'instruction. Ce registre désigne l'adresse de l'opérande, mais est altéré après l'exécution de l'instruction. Il est incrémenté (on lui ajoute 1) ou décrémenté (on lui retranche 1) suivant le code de l'opération. L'indirection peut être combinée avec ce mode d'adressage, rendant très aisée la manipulation de « piles », « files » et autres structures de données.

## Entrées-sorties

### Introduction

Alors que le calculateur est capable d'exécuter des milliers d'opérations par seconde (de 100 000 à 1 000 000), les périphériques sont par comparaison des organes très lents. Ainsi un télétype (ou machine à écrire) n'est capable d'imprimer que quelques caractères par seconde. C'est cette considération de la différence d'échelle entre les vitesses de l'unité centrale et les taux de transferts qui marque l'évolution de la technique des entrées-sorties.

Supposons que nous voulions écrire *n* caractères sur une machine à écrire. Nous pouvons procéder comme suit *n* fois : regarder si le périphérique est prêt. S'il n'est pas prêt, on repose la question, et ce jusqu'à ce qu'il soit prêt. Alors on transfère le caractère dans un registre spécial de l'unité de commande de la machine à écrire, ce qui provoque son impression. Si les *n* caractères ont tous été transférés, c'est terminé, sinon on retourne à la boucle. Quel est l'inconvénient de cette méthode ? Imaginons que *n* = 20, il faut donc transférer 20 caractères. Si la machine à écrire est capable d'imprimer 10 caractères par seconde, le temps total de l'opération est de 2 secondes, pendant lesquelles le calculateur va attendre que le télétype soit prêt. Sur une machine puissante, une telle perte de temps coûte très cher : le calculateur aurait en effet pu exécuter des centaines de milliers d'opérations. Voilà pourquoi ce mode de procéder n'est plus répandu que sur les petits systèmes.

Une autre méthode consiste à connaître l'ordre de grandeur du nombre d'instructions exécutables pendant l'impression d'un caractère. On lance alors le transfert, puis on commence l'exécution d'une séquence d'instructions. A la fin de cette séquence, on place une instruction permettant de savoir si le périphérique est prêt à recevoir le caractère suivant, etc. Cette programmation présente l'avantage d'utiliser les possibilités de la machine de bien meilleure façon que précédemment, mais elle est très lourde. Le programmeur doit avoir sans cesse en tête des problèmes de calculs de temps ; il doit poser des tests tout au long de ses instructions. Cette technique est réservée à des problèmes très particuliers, elle est donc rarement utilisée.

Un grand pas a été franchi lorsque les constructeurs se sont rendu compte que le problème pouvait être posé différemment. Pourquoi l'unité centrale devrait-elle sans arrêt examiner si le périphérique est prêt ? Il est bien préférable de laisser celui-ci signaler de lui-même son état. C'est ce qui a donné naissance à la notion d'*interruption*. Le calculateur est totalement déchargé de la surveillance des périphériques, ce sont ceux-ci qui l'interrompent quand ils sont prêts à travailler. Une interruption est une suspension momentanée du programme en cours, au bénéfice d'un module, qui réalise le transfert demandé en priorité, puis rend le contrôle dès qu'il est terminé. (On appelle module un petit programme autonome, réalisant une tâche très précise.) Les seuls instants volés au calculateur pour effectuer le transfert sont ceux correspondant à l'exécution du module ; ils sont en général très courts. Le programmeur est totalement déchargé de la tâche du transfert, car le module de gestion d'interruption est le plus souvent écrit par le constructeur.

Cependant, aussi satisfaisante que soit cette solution, il reste que, pour une instruction de transfert, le calculateur doit exécuter plusieurs instructions, celles du module d'interruption. Pour éviter cette perte de temps, on a été amené à construire des unités d'échanges sophistiquées : les *canaux*. Ceux-ci prennent complètement en charge le transfert de tout un bloc d'informations. Le programme se charge de fournir au canal les renseignements qui lui sont nécessaires (où trouver les données à transférer, combien de mots il faut échanger, sur quelle unité, dans quel mode, etc.) et d'initialiser le transfert. Il exécute ensuite, sans plus se préoccuper de l'échange : c'est le canal qui se charge maintenant de communiquer au périphérique les caractères. Il n'y a plus d'interruption pendant le transfert. Mais au rythme du périphérique, le canal viendra de temps à autre prélever un cycle de mémoire pour lire l'information suivante. Lorsque tout l'échange est terminé, le canal provoque alors une interruption, pour signaler à l'unité centrale la fin du transfert. La simultanéité entre les entrées-sorties et l'exécution du programme est presque totale. Le temps consacré par le calculateur au transfert ne consiste qu'en un cycle mémoire de temps à autre.

Les canaux ont encore évolué. Certains sont capables d'effectuer plusieurs opérations d'entrées-sorties successives, par chaînage. Ce sont eux-mêmes de petits calculateurs programmables, véritables unités centrales indépendantes. La tentation est alors forte d'augmenter leur puissance et leur autonomie. Ainsi, sur le CDC 6600, les entrées-sorties sont gérées par de petits calculateurs frontaux. Sur le CDC 7600, machine extrêmement puissante, c'est un complexe de 5 ou 6 petits ordinateurs qui assure la gestion des échanges et aussi certaines tâches du système.

### Description de l'interface

Pour que les données émises par les périphériques soient comprises par l'unité centrale, et réciproquement, il est nécessaire de créer un dispositif de communication et traduction entre ces organes. C'est ce dispositif qu'on appelle *interface*. Les signaux échangés à travers cette interface sont de deux types : les commandes et synchronisations permettant le dialogue entre les deux partenaires et l'information à transférer proprement dite.

Parmi les fils qui fournissent les commandes, on peut en distinguer trois principaux. Le premier indique le sens de l'échange. Appelons-le *sens*. Suivant la tension qui règne dans ce fil, *sens* prendra deux valeurs (0 ou 1) signifiant : entrée de données ou sortie de données. Le second fil sert à indiquer que l'unité centrale désire le transfert de l'information. Une impulsion sera envoyée au moment judicieux par le fil *go*. La troisième information est fournie par le périphérique pour indiquer qu'il est prêt pour un nouveau transfert. Il positionne alors le niveau correspondant sur le fil *prêt*. Les fils d'information sont en nombre variable : 6, 7 ou 8 pour les machines à écrire suivant le code qu'elles utilisent ; 8 à 12 pour les organes de conversion analogique-digital suivant la précision fournie.

Nous allons examiner la **procédure des échanges** en tenant compte du fait que les termes « entrée » et « sortie » sont considérés du point de vue de l'ordinateur. Une entrée d'information se fait du périphérique vers l'unité centrale et une sortie de l'unité centrale vers l'extérieur. Le principe général d'une entrée d'information est le suivant : l'unité d'échange positionne l'indicateur « sens » à la valeur « entrée ». Puis elle envoie une impulsion sur le canal « go » qui déclenche la transmission par l'organe périphérique de l'information sur les fils correspondants. Lorsque cela est fait, le périphérique est à nouveau prêt pour un nouvel échange et émet le signal « prêt ». La prise en compte de l'information est faite dans l'unité d'échange après la réception de ce signal.

Une sortie d'information s'effectue suivant la procédure ci-dessous : l'unité d'échange positionne l'indicateur « sens » pour signifier « sortie ». Puis elle demande l'échange en envoyant une impulsion sur le fil « go ». L'organe périphérique sollicité prend alors en compte la signification des fils d'information. L'ordre correspondant est exécuté (impression d'un caractère, etc.). Lorsque le périphérique a accompli sa mission, et peut donc effectuer une autre sortie, il positionne le fil « prêt ».

Une unité d'échange peut être en liaison avec plusieurs périphériques : on parle alors de *multiplexage*. Il faut spécifier quel est le périphérique que l'on choisit. La logique est plus compliquée dans ce cas. Une autre structure de transfert peut reposer sur le principe de l'*unibus*. Il s'agit d'une seule ligne de transmission, connectée à une unité d'échange, transitant à travers toutes les unités de commandes des périphériques. L'information comporte l'indicatif du périphérique sélectionné. Toutes les unités de commandes ne se reconnaissant pas sur la ligne laissent passer l'information sans l'utiliser. Celle qui est sélectionnée l'exploite, en revanche, lorsqu'elle lui parvient.

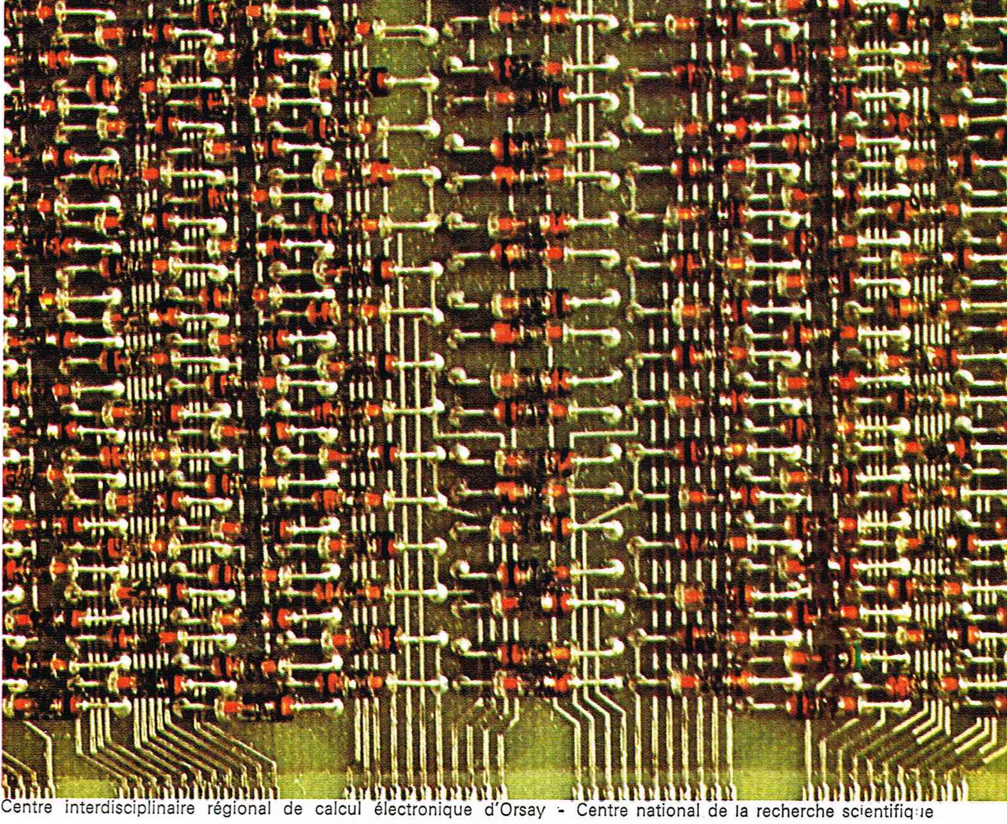
L'ordinateur travaille en général par mot. Nous avons vu que les périphériques peuvent avoir besoin d'un nombre variable de bits. La standardisation se fait au niveau de l'unité d'échange qui possède un registre ayant la longueur d'un mot machine. Lorsque la transmission des données se fait en série, ce registre est à décalage et l'unité d'échange se charge de la transformation série-parallèle. Ainsi, l'ordinateur n'a pas à se préoccuper de la technologie et de la logique des périphériques, ce qui permet au programmeur d'avoir un travail plus aisé au niveau des entrées-sorties. L'unité centrale n'a à transmettre qu'un mot sans se soucier réellement de l'échange.

A l'aide de cette description de l'unité d'échange, nous pouvons passer en revue les différentes **techniques utilisées pour transférer les informations.** Nous étudierons pour cela les méthodes d'échange d'une seule information. Pour réaliser cet échange, il est nécessaire de disposer de certaines informations : l'adresse en mémoire de l'information échangée. Ce sera l'adresse de la cellule où est rangée l'information s'il s'agit d'une sortie, et celle de la cellule où l'on veut récupérer l'information dans le cas d'une entrée. Appelons X cette adresse. Il est nécessaire aussi de spécifier le sens de l'échange ainsi que l'instant précis du transfert. C'est dans la façon de donner ces informations au calculateur que se distinguent les différents modes d'échange.

Le *transfert programmé* suppose l'ordinateur doté de deux instructions : entrer à X et sortir à partir de X. La demande de transfert (« go ») se fait au moment de l'exécution de l'instruction. Le sens est déterminé à partir de son code. L'unité externe peut aussi forcer l'instruction d'entrée-sortie. En ce cas, l'exécution de l'instruction en cours de traitement dans l'unité centrale s'achève et la demande d'entrée ou de sortie est prise en priorité. Le programme reprend ensuite, après avoir été interrompu pendant le temps d'une instruction.

De même que dans le cas précédent, c'est l'unité externe qui prend l'initiative dans le *transfert « par vol de cycle »*. L'unité centrale termine le cycle mémoire en cours, et accorde le cycle suivant à l'unité externe qui en profite pour ranger ou lire l'information en mémoire, suivant le sens du transfert. Ce mode est plus rapide, car l'exécution du programme en cours n'est retardée que pendant le temps d'un cycle. Nous avons vu que l'exécution d'une instruction comportait plusieurs cycles mémoire.

Dans le *transfert par accès direct mémoire* (DMA pour « Direct Memory Access »), le programme n'est interrompu que pendant un cycle mémoire si l'unité centrale en a besoin à cet instant précis ; sinon, le programme ne sent pas passer l'entrée-sortie. Dans ce mode, le calculateur est doté d'un dispositif qui permet deux accès à la mémoire : l'un est réservé à l'unité centrale, l'autre à l'unité externe. Les demandes de cycle mémoire sont adressées à un contrôleur qui gère les priorités entre les différentes demandes. Les canaux utilisent cette particularité pour fonctionner.



Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Gros plan sur les composants d'une carte logique : transistors, diodes et résistances.***

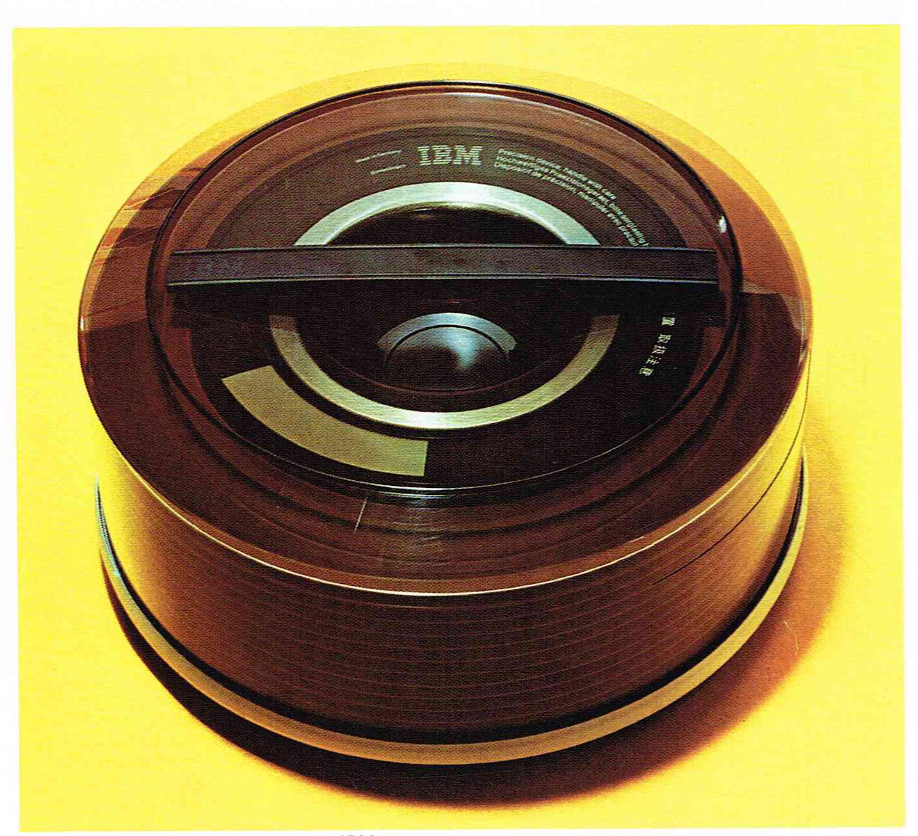
### *Les interruptions*

Si l'ordinateur ne pouvait voir le monde extérieur que sur sa propre initiative, il se produirait l'une des deux possibilités suivantes : ou bien le calculateur passerait une grande partie de son temps à scruter les différents périphériques et serait donc ralenti, ou bien il faudrait beaucoup d'unités centrales et les événements extérieurs lui parviendraient avec du retard, ou même ne lui parviendraient pas si l'information était volatile. La solution à ce problème consiste à donner une certaine initiative aux unités externes : celles-ci ont la possibilité d'envoyer un signal à l'unité centrale lorsqu'un événement se produit.

Bien qu'utilisé pour les entrées-sorties, le système d'interruptions a un domaine d'utilisations très vaste. Nous retiendrons les principales : les pannes machine, en cas de baisse de la tension d'alimentation du calculateur, ou d'erreur de parité mémoire; les erreurs de programme, occasionnées par une instruction illicite, ou une tentative d'adressage impossible ou interdit, ou encore une opération arithmétique dont le résultat excède la capacité de la machine ; les interruptions d'entrées-sorties générées par les unités externes pour signifier la fin d'un échange ou une anomalie ; les interruptions externes, provoquées pour alerter la machine en cas de modification du monde extérieur, particulièrement dans le cas où le calculateur pilote un procédé industriel ; les interruptions d'horloge permettant le comptage du temps, qui peuvent provenir d'une horloge interne du calculateur, ou d'un phénomène extérieur.

Dans les calculateurs ne possédant qu'un seul niveau d'interruption, chacune de ces causes provoque une seule et même interruption. Le programme de gestion des interruptions doit alors examiner une à une les causes pour identifier l'origine de l'alarme et la traiter, ce qui prend beaucoup de temps machine ; dans le cas d'anomalies très urgentes, ces précieuses microsecondes peuvent coûter très cher. La priorité entre les différents cas d'alarme est alors réglée par le sens d'exploration des causes. Ainsi, si deux organes appellent en même temps, le cas le premier réglé sera celui du premier reconnu.

Pour accélérer la prise en compte de l'alarme, les ordinateurs plus puissants possèdent un système d'alarme hiérarchisé. Chaque niveau d'interruption regroupe une ou plusieurs causes d'appels ; un programme de traitement est associé à chacun de ces niveaux ainsi qu'une priorité.




IBM

▲ *Le* disque magnétique rigide *est une mémoire auxiliaire de l'ordinateur pouvant stocker de 1 Mo à 400 Mo, et dépassant ainsi largement les possibilités de stockage de la mémoire centrale.*

Lorsqu'une interruption apparaît sur un niveau, le traitement exécuté en unité centrale est suspendu, et le module associé au niveau est lancé pour traiter l'anomalie. Il doit, bien sûr, commencer par chercher la cause de l'alarme parmi celles qui correspondent à son niveau ; comme la recherche est faite sur un nombre faible de cas possibles, elle est très rapide. Mais que se passe-t-il lorsqu'une interruption survient pendant l'exécution du programme chargé justement de traiter une interruption ? Tout dépend de la priorité associée à ce nouvel appel.

Illustrons cela par un exemple. Supposons que le calculateur que nous étudions possède trois niveaux d'interruption avec les priorités 1, 2, 3. Sur le niveau 3, le plus prioritaire, est connecté un capteur de température qui émet un signal d'alarme lorsque le processus industriel qu'il surveille chauffe trop. Le niveau 2 regroupe l'horloge et le canal d'entrée-sortie. Le niveau 1 est consacré à la machine à écrire de l'opérateur. (Cet exemple est, bien sûr, fictif.) Les considérations qui permettent d'ordinaire d'associer à une cause d'interruption sa priorité sont évidemment l'urgence de la décision à prendre, la durée de validité de l'information, mais aussi la durée du traitement à effectuer. A un instant donné, sur notre calculateur survient un appel de l'horloge. Celle-ci émet un signal, périodiquement, afin que l'ordinateur ait conscience du temps qui s'écoule. Le programme qui s'exécutait en unité centrale est arrêté dès la fin de l'instruction en cours. Le module chargé de la gestion de l'horloge entre alors en action ; il met à jour la date et regarde dans une liste s'il y a des programmes à lancer à cette heure-ci. Pendant l'exécution de ce module, une autre interruption survient. Deux cas peuvent alors se produire : si l'appel est fait sur le même niveau, 2, ou s'il est émis sur le niveau 1, moins prioritaire, il est mis en attente et sera pris en compte dès que le module de gestion de l'horloge sera terminé ; en revanche, si c'est le niveau 3 qui a lancé l'alarme, sa priorité étant supérieure à celle du programme en cours, l'exécution du module du niveau 2 est suspendue. Le module associé ou capteur de température prend les décisions qui s'imposent (ouverture ou fermeture d'électrovannes, arrêt de la plaque chauffante, etc.). Lorsque c'est terminé, le module de niveau 2 reprend le contrôle de l'unité centrale et poursuit son exécution jusqu'à sa fin, à moins qu'une nouvelle interruption plus prioritaire ne le mette en attente. Le programme qui s'exécutait en mémoire centrale ne reprendra son cours que lorsque toutes les interruptions auront été traitées.

▶ *A gauche, l'unité de disques de l'ordinateur IBM 370/158 ; page ci-contre, à droite, deux* dérouleurs de bandes.

L'instruction qui termine un module d'interruption est une instruction spéciale d'acquittement. Les programmes normaux ou « de fond » sont considérés comme ayant la priorité minimale.

### *Les périphériques*

On appelle périphérique d'un ordinateur tout appareil connecté à cet ordinateur mais n'en faisant pas partie. Cette définition, bien qu'elle paraisse claire et sans ambiguïté, ne résout pas les problèmes posés, par exemple par l'horloge interne ! Nous considérerons donc que les périphériques sont tous les organes connectés à une machine par l'intermédiaire d'interfaces. Leur gamme est extrêmement étendue. Nous pouvons distinguer trois classes principales : les mémoires de masses ou auxiliaires ; les périphériques adaptés au dialogue homme-machine ; les périphériques adaptés à l'environnement du calculateur.

La mémoire centrale d'un ordinateur est nécessairement limitée, et cela en particulier pour des raisons technologiques (adressage, etc.) et financières ; pour augmenter la puissance d'un ordinateur, on est amené à lui adjoindre des **mémoires auxiliaires.** Les performances de celles-ci sont jugées en termes de caractères, qui, ici, correspondent chacun à un octet, soit 8 bits en général. On a toujours à réaliser un compromis entre capacité et temps d'accès : en général, plus une mémoire peut contenir d'information, plus le temps d'accès à cette information est élevé. Les technologues modernes cherchent à résoudre cette contradiction de façon satisfaisante ; nous examinerons en particulier les disques et les dispositifs à rubans magnétiques.

● Un *disque magnétique,* tel qu'il est utilisé en informatique, mesure environ 35 cm de diamètre ; il est fabriqué en matière plastique, et recouvert d'une pellicule d'oxyde magnétisable. Il se présente différemment suivant qu'il est « souple » ou « rigide ».

Les *disques rigides* peuvent être seuls ou empilés de façon à former un édifice d'une dizaine de plateaux superposés et espacés pour laisser passer les têtes de lecture. On utilise les deux faces de chaque disque (sauf les faces de garde). Les têtes de lecture sont solidaires et se déplacent simultanément par l'intermédiaire d'un bras. Ainsi, toutes les pistes situées dans un même cylindre sont explorées en même temps, bien qu'une seule soit lue ou



IBM

écrite au cours d'un transfert. Le disque tourne en permanence à une vitesse variant de 1 200 à 2 400 tours par minute suivant les modèles.

Deux conséquences découlent de ces considérations : d'une part, lors de l'écriture d'un caractère, chaque bit est écrit sur le disque de façon séquentielle (l'un après l'autre) ; d'autre part, les pistes sont concentriques, à la différence des microsillons. Chaque caractère peut être adressé, et les réécritures se superposent exactement de façon que la modification d'un seul caractère n'altère pas le contexte, ce qui permet d'effectuer des mises à jour : nous verrons que c'est une particularité très importante du disque. Le nombre de caractères que l'on peut stocker sur un disque varie de 1 Mo à 400 Mo. (Le symbole Mo [méga-octet] signifie : million de caractères.) Comparé à la taille d'une mémoire centrale, ce chiffre est énorme : les plus grosses machines ont des mémoires pouvant atteindre 1 Mo, rarement plus.

Le temps d'accès à un caractère varie suivant la position du bras par rapport à celui-ci au moment de la demande d'échange ; il est en moyenne d'environ 100 ms ; ce temps inclut le délai mécanique du bras, qui doit se positionner sur la bonne piste, et l'attente due à la rotation, qui est en moyenne d'un demi-tour. Il est bien évident que le temps de recherche n'est pas doublé pour deux caractères ; en effet, si les caractères cherchés sont écrits en séquence sur la même piste, seul le temps d'accès au premier intervient, puisque le délai de lecture ou d'écriture est très faible. Pour éviter le délai dû au déplacement du bras, les constructeurs ont créé des disques à têtes fixes. Chaque piste est dotée d'une tête de lecture ; le temps d'accès à l'information est donc réduit au délai de rotation du disque. Le nombre de têtes magnétiques est ainsi multiplié, ce qui rend ce matériel beaucoup plus coûteux ; il est cependant intéressant pour contenir les informations auxquelles on accède très souvent (principalement : programmes systèmes).

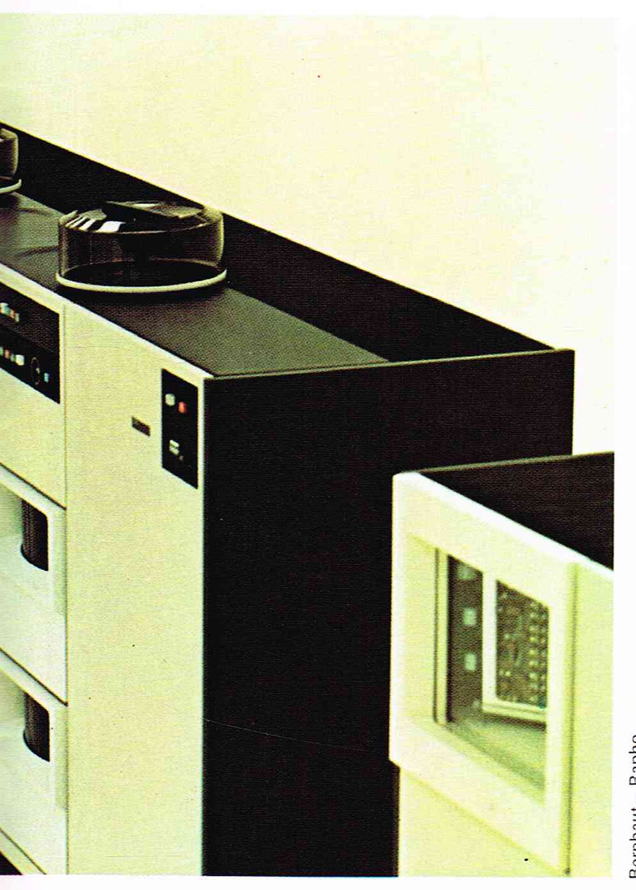
Fonctionnant sur un principe analogue, les *disques souples* sont tous destinés aux minicalculateurs ou aux microcalculateurs. Ils occupent un faible volume ; leur prix est réduit et leur temps d'accès très intéressant ; de plus, un grand effort de standardisation est fait sur ce marché. Leur aspect diffère de celui des disques rigides : leur diamètre est réduit de moitié (18 cm) et ils sont protégés de façon permanente dans une enveloppe de carton-pâte. Contrairement aux unités à disques rigides, où les têtes de lecture affleurent les disques sans les toucher, il y a ici contact physique. L'ordre de grandeur de la capacité de stockage est le million de caractères.

● Une *bande magnétique* est un ruban de plastique recouvert d'oxyde magnétisable, comme les disques, analogue à une bande classique de magnétophone, tout



IBM

***▲ Une unité de saisie des données utilisant comme mémoire des mini-disques souples de 20 cm de diamètre pouvant contenir une information équivalente à celle stockée par 3 000 cartes perforées.***






Bernhaut - Rapho

en étant plus large et plus longue (730 m). L'information est stockée sur la bande en parallèle et en série à la fois. Les caractères sont disposés séquentiellement, c'est-à-dire à la suite l'un de l'autre, les 6 ou 8 bits formant chaque caractère codés en parallèle. On appelle *pistes* les traces sur lesquelles sont stockés les bits; c'est la structure du dérouleur de bande qui fixe le nombre de ces pistes; dans tous les cas, il existe une piste supplémentaire, qui contient la parité du caractère : c'est un dispositif de contrôle qui permet de détecter les anomalies survenant pendant le transfert.

Les *dérouleurs de bande,* semblables à des magnétophones dans leur principe, disposent de 7 ou 9 têtes de lecture et d'écriture. Les fonctions programmables ou manuelles sont l'avance, l'avance rapide et, le rebobinage, tandis que la lecture et l'écriture sont uniquement programmées. Pendant les transferts, la bande se déroule à une vitesse de 2 mètres par seconde. Elle a une grande capacité de stockage : suivant les densités (800 ou 1 600 bpi : bits per inch ou bits par pouce) et avec les espaces laissés disponibles en prévision des arrêts et des démarrages entre chaque lecture-écriture de bloc, on peut écrire sur une bande jusqu'à 30 millions de caractères.

Les avantages des bandes magnétiques sont leur très faible prix, leur solidité et leur volume réduit. En comparaison, les disques, pour une capacité de même ordre de grandeur, sont beaucoup plus chers et fragiles. En contrepartie, l'accès à l'information est beaucoup plus lent sur les bandes, car, pour accéder à un caractère, il faut auparavant lire tous ceux qui précèdent : c'est ce que l'on appelle organisation séquentielle, par opposition à l'accès direct des disques. De plus, il n'est pas possible de faire de la mise à jour sur une bande magnétique, car on n'est jamais certain de l'endroit où l'on écrit, et l'information risquerait fort d'être détériorée.

● Fonctionnant sur un principe analogue, les *cassettes magnétiques* se sont développées à cause de leur faible



IBM

▲ ***Le** lecteur de cartes de l'ordinateur IBM 370/158; cet appareil est capable de lire de 800 à 1 200 cartes perforées par minute.*

▶ ***Intérieur de la** perforatrice de cartes de l'ordinateur UNIVAC 9300.*

Bernhaut - Rapho

prix et de leur facilité de manipulation ; mais leur capacité de stockage est faible (300 000 caractères en moyenne). Ces caractéristiques expliquent que, bien qu'absentes dans les gros systèmes, les cassettes sont, avec les disques souples, les périphériques privilégiés des minicalculateurs, et surtout des microcalculateurs.

Les **périphériques permettant le dialogue homme-machine** sont des organes transformant les caractères déchiffrables par l'homme en impulsions pour le calculateur, et inversement. Les plus utilisés sont les lecteurs de cartes, les imprimantes et les machines à écrire. On peut aussi y ranger les écrans de visualisation et les tables traçantes.

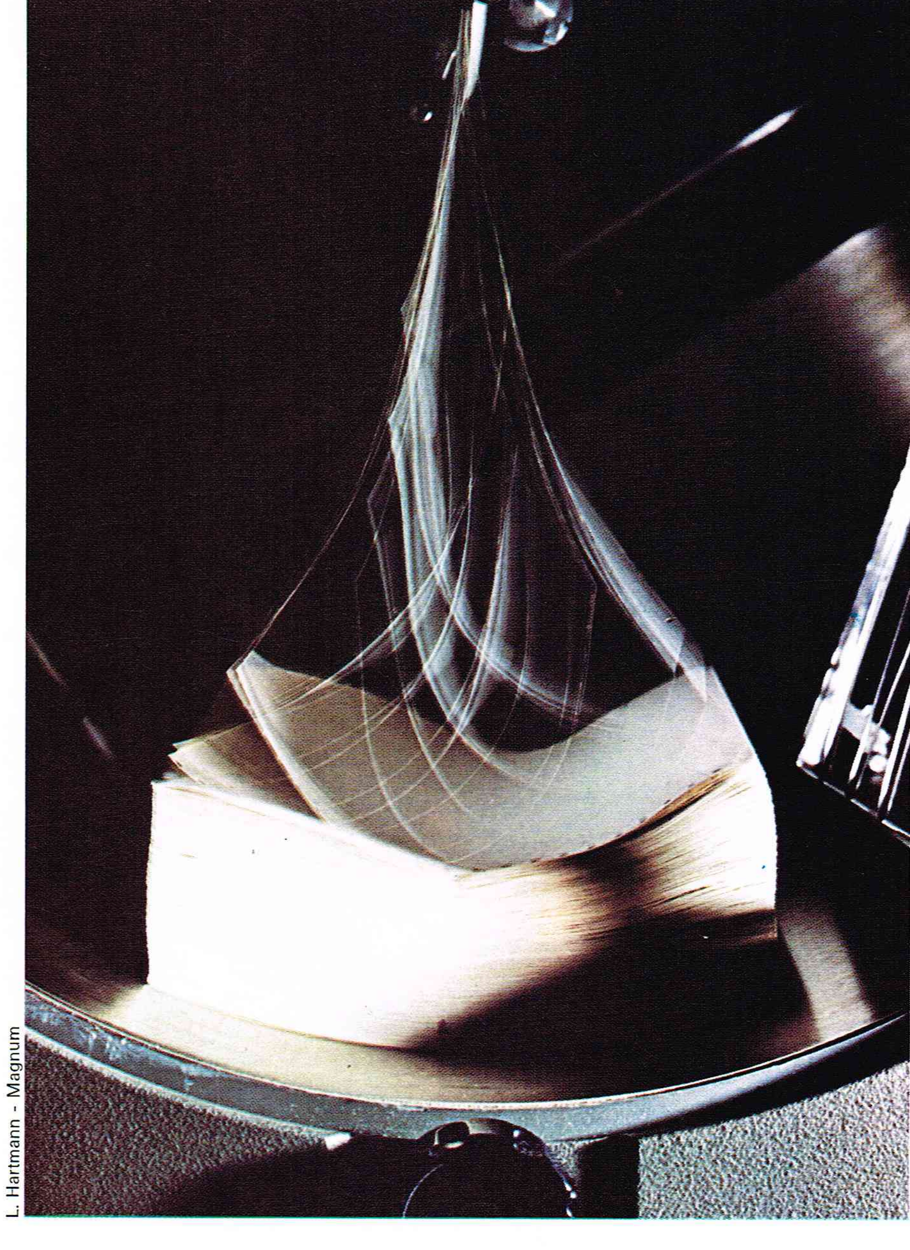
● Le *matériel à carte perforée* est le précurseur de l'ordinateur actuel. La facilité de mise à jour des cartes et le fait qu'elles sont lisibles par l'être humain font d'elles un moyen très courant de communication avec la machine, pour lui fournir des ordres et des données. Une carte perforée est rigide, en carton, avec un angle coupé pour permettre de bien la positionner. On peut écrire 80 caractères sur une carte; chaque caractère est codé par un ou plusieurs trous disposés sur un des 12 emplacements prévus à cet effet sur une même colonne. Le code universellement utilisé par toutes les machines à perforer est le code Hollerith.

Les *lecteurs de cartes* sont des appareils comportant deux bacs. Dans le premier, sont disposées les cartes à lire par la machine. Sur un ordre du calculateur, un dispositif entraîne la carte sélectionnée à travers le dispositif de lecture. Sur les lecteurs électromagnétiques, 12 balais caressent la carte, créant par contact une impulsion électrique quand un trou se présente. Sur les lecteurs optiques, l'information est détectée par des cellules photoélectriques. Souvent, un second dispositif de lecture suit le premier de façon à contrôler le bon déroulement de la lecture. Les impulsions reçues pour chaque caractère sont alors converties et transmises au calculateur. D'après le principe même de son fonctionnement, un lecteur de cartes ne peut pas avoir de nouveau accès à l'information portée par une carte déjà lue. Il ne peut pas non plus s'interrompre dans la lecture d'une carte et reprendre ensuite. C'est un organe d'entrée d'information. Il ne peut en aucun cas écrire. Le second bac reçoit les cartes lues par l'ordinateur dans leur ordre de lecture.

Le *perforateur de cartes* est un appareil indépendant, incapable de lire, mais servant à perforer les cartes sur l'ordre de la machine. Les modifications automatiques de fichiers sur cartes peuvent se faire ainsi, bien que cette pratique ait pratiquement disparu. En effet, les problèmes de stockage posés par les cartes perforées, qui sont encombrantes, qui craignent l'humidité (et le feu!), donnent un avantage décisif aux unités magnétiques (bandes et disques) pour la conservation de données nombreuses.

● Les réponses aux questions posées par l'ordinateur à l'aide de ces cartes sont en général *listées* sur des *imprimantes*. Ce sont des appareils qui permettent d'imprimer des informations en grandes quantités et en plusieurs exemplaires. Les jeux de caractères utilisés sont ceux que nous connaissons. Les performances de ces organes sont diverses et se chiffrent en lignes par minute. Les imprimantes les plus utilisées ne dépassent en général pas 2 200 lignes. Pourtant, avec une nouvelle technologie (électrostatique), IBM annonce la création d'une imprimante pouvant écrire 13 000 lignes par minute. Ce chiffre est absolument étonnant, il suffit pour s'en convaincre de regarder « sortir » 2 000 lignes par minute ! La technologie classique utilise un système de marteaux (132) qui frappent à la volée sur une chaîne qui se déroule à grande vitesse, imprimant ainsi le caractère désiré. La précision requise par ce procédé limite les performances et explique le prix élevé de ces appareils.

● Les *machines à écrire* servent à la fois d'organe d'entrée et de sortie. L'entrée des données se fait par l'intermédiaire d'un clavier. Chaque frappe d'une touche provoque une interruption, et le calculateur vient lire le caractère frappé. La sortie est faite sur papier ou sur un écran. Les machines à écrire à papier utilisent une boule, ou un système à aiguilles. Les écrans sont purement alphanumériques et se comportent comme le dispositif à papier, ou sont graphiques et sont alors utilisables comme une table traçante. Les machines à écrire sont très utilisées.


L. Hartmann - Magnum

▲ ***Les résultats des opérations posées à l'ordinateur sont généralement donnés sous forme écrite par une* imprimante *qui réalise des « listings ».***

L'une d'elles, privilégiée par le système, est la « console maîtresse ». C'est devant elle que se tient l'opérateur chargé de la direction de la machine. Elle lui sert à « converser ». S'il en existe d'autres, celles-ci sont à la disposition des utilisateurs dans le cas de systèmes multiprogrammés. L'utilisation de langages conversationnels (Basic) nécessite une machine à écrire, de même que tous les systèmes utilisant les banques de données. C'est le cas, en particulier, des dispositifs de réservations automatiques d'avions, de trains, etc.

Les machines à écrire sont parfois aussi dotées d'un *lecteur-perforateur de ruban*. Ces rubans en papier permettent une communication aisée de machine à machine, à cause de leur faible coût et de leur volume réduit. Cependant, leur fiabilité n'est pas exceptionnelle et, à moins d'une grande habitude, ils ne sont pas lisibles directement par l'homme.

● Lorsque les caractères ne suffisent plus, il faut avoir recours aux *tables traçantes*. Celles-ci sont capables de dessiner toutes les courbes, tous les croquis ou schémas calculés par l'ordinateur. L'ordinateur commande d'une part un bras qui peut se déplacer de gauche à droite par translation X et d'autre part la position Y sur ce bras de la plume. Tous les points de la table peuvent ainsi être adressés à l'aide de deux quantités X et Y. De plus, par l'intermédiaire de relais, le calculateur commande le lever et le baisser de la plume. Les tables traçantes suivant ce principe sont assez lentes, mais très précises. Dans d'autres cas, c'est le papier qui se meut sous un bras fixe. Il existe aussi des tables sur lesquelles la plume est montée sur un dispositif à coussin d'air isolé des bords de la table et se repérant de façon électrostatique.

● Les *écrans alphanumériques* permettent un affichage très rapide de données succinctes. L'écran ne peut en effet contenir qu'un nombre limité de caractères (de l'ordre de 1 000), mais ceux-ci sont affichés en moins d'une seconde. L'inconvénient majeur qu'ils présentent est



▶ *L'écran cathodique alphanumérique (avec imprimante) de l'ordinateur IBM 370/158; cet ensemble permet l'entrée directe des données et aussi l'interrogation des fichiers; le crayon lumineux permet de sélectionner un point de l'écran afin d'effectuer une correction.*

IBM

l'absence de trace écrite. Pour y remédier il est nécessaire de sortir les résultats à conserver sur une imprimante ou de faire une photo de l'écran; certains modèles sont associés à des « hard copy units », qui copient l'écran sur un papier, à la manière d'une photocopie, en un temps très court. Cependant, le coût du matériel et de la photocopie est élevé. Les écrans cathodiques sont fréquemment couplés à des moyens d'entrée tels que le « light-pen » (ou crayon lumineux) qui permet de sélectionner un point de l'écran de façon approximative, ou les curseurs qui remplissent la même fonction avec une meilleure précision, mais de façon moins aisée.

● Les *lecteurs optiques* permettent de faciliter l'entrée des informations dans le calculateur et fonctionnent déjà dans certains domaines. Cependant, les problèmes de la reconnaissance de l'écriture manuscrite ne sont pas encore résolus dans le cas général. Certains ordinateurs sont dotés d'organes vocaux. La synthèse de la parole est maintenant au point, mais l'ordinateur n'est pas encore capable de reconnaître la voix humaine de façon sûre.

Les périphériques d'un calculateur peuvent ne pas être physiquement dans la même pièce, ils peuvent être situés à plus de 100 km de l'unité centrale; on les appelle alors *terminaux,* et l'on parle de **télé-informatique.** Les techniques de télétraitement ou de télétransmission sont nécessaires; la ligne servant à assurer la liaison peut être une ligne spéciale ou une ligne téléphonique des P. T. T. L'information ne transite pas dans ces lignes de la même façon que dans les câbles qui lient les périphériques à l'ordinateur. Il faut effectuer la transformation adéquate par l'intermédiaire d'un MODEM (abréviation usitée pour modulateur-démodulateur). Les données saisies par le terminal d'entrée sont modulées par le MODEM qui y est connecté, parcourent la ligne et sont démodulées par le MODEM branché sur l'ordinateur. Les résultats émis par le calculateur vers un terminal de sortie suivent le chemin inverse.

Les terminaux ne sont toutefois pas toujours de simples périphériques. Le même MODEM regroupe en général au moins un organe d'entrée (lecteur de cartes) et un organe de sortie (imprimante). Les plus sophistiqués sont susceptibles de recevoir en plus un support magnétique. Enfin, le terminal peut fort bien être un ordinateur à part entière lui aussi, ce qui lui permet de traiter les problèmes qui sont de sa compétence de façon locale et de n'appeler l'ordinateur principal que lorsqu'il ne suffit plus. Il est capable d'économiser l'information à transférer en faisant des compactages et des mises en forme.

Il ne faut pas perdre de vue que la vitesse de transfert par ces lignes est limitée. L'unité utilisée est le *« baud »* qui représente une impulsion élémentaire par seconde, ce qui ne correspond pas tout à fait au bit par seconde, car l'information utile est entourée d'impulsions de contrôle et de synchronisation. On peut grossièrement estimer que la transmission d'un caractère de huit bits nécessite dix impulsions élémentaires. Les liaisons télégraphiques fonctionnent à 50 bauds (environ 5 caractères par seconde), mais cette vitesse pourrait passer à 200 bauds (20 caractères par seconde), ce qui est de l'ordre de la vitesse d'impression d'une machine à écrire. Les lignes téléphoniques sont beaucoup plus rapides : de 800 à 9 600 bauds.

Des réseaux d'ordinateurs très compliqués sont déjà opérationnels aux États-Unis et en Europe. Il ne s'agit plus de relations ordinateur-terminal dans ce cas. L'intérêt de ces réalisations sophistiquées réside dans la transmission rapide de données immédiatement assimilables. Il va de soi que des problèmes importants sont posés au point de vue technique par ces réseaux. La priorité de communication et la standardisation en sont quelques-uns; nous ne parlons évidemment pas des problèmes légaux, philosophiques et politiques.

Les derniers périphériques dont nous parlerons sont les **convertisseurs analogiques-digitaux.** Ces organes permettent à l'ordinateur de coder en nombres binaires des tensions électriques, et réciproquement de piloter des organes analogiques. C'est à eux que sont reliés des *capteurs des processus* que surveille le calculateur : thermocouples, manomètres, voltmètres, etc. Ce sont eux qui fourniront les commandes aux tables traçantes et aux écrans cathodiques. L'ordinateur ne peut commander les relais et autres dispositifs électromécaniques que par leur intermédiaire. Le traitement de signal, qui est une utilisation de l'ordinateur, s'effectue à partir des valeurs numériques obtenues par le calculateur à travers ces convertisseurs.



Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Vue générale de la salle des ordinateurs du Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay.***

## *Les langages de programmation*

Nous avons vu comment est constitué un ordinateur. Il importe maintenant de le faire travailler, et, pour cela, de lui donner des ordres. La suite d'instructions qu'exécute un ordinateur s'appelle un *programme*, l'ensemble de tous les programmes exécutables par un calculateur donné le *logiciel* (ou *software*), par opposition au *matériel* (ou *hardware*). Lorsque l'on met un ordinateur sous tension, il est incapable de faire la moindre chose, il est en état d'attente. Pour qu'il commence à travailler, il faut lui inculquer un rudiment d'intelligence. Cette phase d'initialisation s'appelle le « bootstrap » (ou chausse-pied). Elle consiste à rentrer, à l'aide des clefs situées sur la façade du calculateur, un petit programme, toujours le même, qui a pour rôle de lire sur une unité magnétique (disque, bande) ou autre (ruban) un programme plus important qui lui permettra de retrouver la mémoire de ce qu'il sait faire. Rentrer à l'aide des clefs un programme en mémoire centrale est une tâche ingrate et délicate; c'est pourquoi, dans la plupart des calculateurs, cette procédure est câblée. Lorsque cette phase est terminée, le calculateur est prêt à exécuter des ordres, converser avec l'opérateur, etc. Voyons les différentes possibilités qui s'offrent à l'homme pour communiquer sa volonté à la machine.

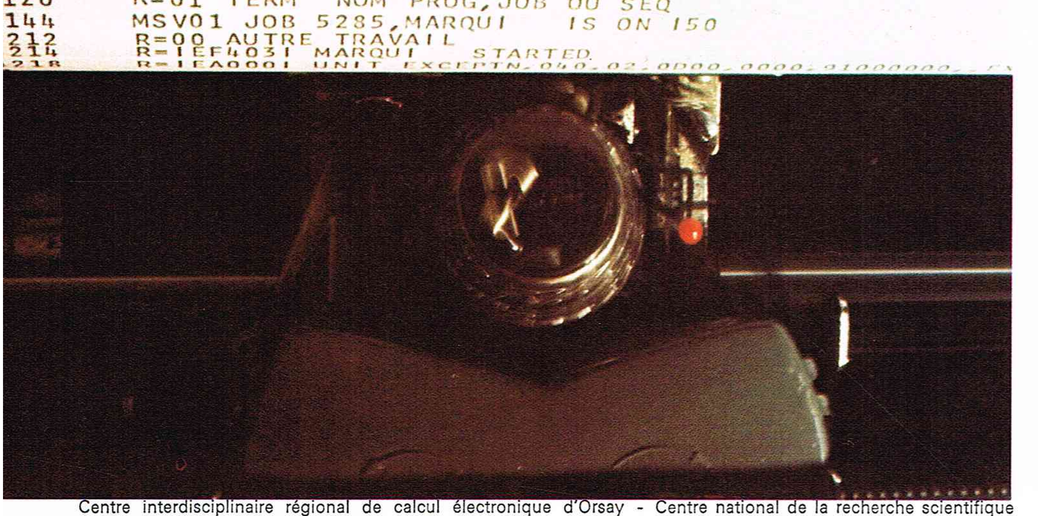
La première méthode consiste à écrire ses programmes en **langage machine.** Ce langage se compose exclusivement de 0 et de 1, comme nous l'avons vu dans l'étude de l'unité centrale. Il va sans dire que cette façon de procéder est très rarement utilisée. Il est en effet difficile de se remémorer le code de toutes les instructions de la machine; il faut de plus savoir avec précision l'adresse en mémoire des quantités que l'on manipule.

Pour faciliter la tâche des utilisateurs, les constructeurs livrent avec leur machine un programme appelé *programme d'assemblage,* capable d'effectuer la conversion d'un texte plus aisément compréhensible par l'homme en langage machine. Ce texte est rédigé en *assembleur*. Les facilités offertes par ce langage sont nombreuses. Les codes d'opérations sont désignés par des symboles mnémoniques tels que : ADD pour additionner, MUL pour multiplier, etc. Le programme d'assemblage s'occupe de gérer les adresses en mémoire des données de l'utilisateur. Ainsi, sans plus savoir qu'elle occupe la cellule mémoire d'adresse 1031, le programmeur peut désigner la valeur qu'il manipule par un nom évocateur, par exemple X. S'il veut ajouter une constante logée en CONST à cette valeur X, il écrira ADD CONST, X au lieu de 17 1037 1031 par exemple.

Les langages d'assemblage permettent de rédiger des programmes plus sophistiqués. Ainsi, les compilateurs que nous verrons par la suite peuvent être écrits en langage assembleur. L'utilisation de macro-instructions est souvent permise. Cette technique extrêmement puissante évite d'avoir à répéter des séquences identiques : il suffit de les désigner par un nom symbolique. Elles seront alors réintroduites par le programme d'assemblage à l'endroit où elles sont référencées. Bien qu'il présente un grand progrès par rapport au langage machine, l'assembleur ne résout pas certains problèmes : le programmeur doit être très familiarisé avec la machine; de plus, il est difficile de mettre au point un programme rédigé dans cette langue. Des machines différentes ont des langages machine et donc des assembleurs différents, ce qui complique singulièrement la transplantation de programmes d'une machine à l'autre.

Pour remédier à ces inconvénients, des **langages plus évolués** ont été créés, accompagnés d'efforts de standardisation. Citons parmi les plus utilisés : ALGOL 60 (Algorythmic Oriented Language), FORTRAN (Formula Translation) et BASIC (Beginners Symbolic Instruction Code) dans le domaine scientifique, et COBOL (Common Business Oriented Language), PL1 (Programming Language 1) pour la gestion. A vocation mixte, nous trouvons aussi ALGOL 68 et APL (A Programming Language). Il existe beaucoup d'autres langages évolués, nous n'allons pas les nommer tous. Ils couvrent les domaines de traitement de caractères, des listes et de la simulation. Il existe aussi des programmes de *cross-assemblage* permettant l'interprétation par une machine d'un programme écrit dans le langage machine d'une autre.

Voici les principaux avantages des langages évolués : ils sont indépendants théoriquement de la machine utilisée, ils permettent une manipulation aisée de structures complexes, ils sont faciles à comprendre et ils incluent la gestion automatique des périphériques d'usage courant. L'inconvénient qui en découle tient à la différence de



Centre interdisciplinaire régional de calcul électronique d'Orsay - Centre national de la recherche scientifique

▲ ***Informations sur le déroulement des travaux exécutés par l'ordinateur; ces informations sont fournies automatiquement et inscrites sur console maîtresse par le système de programmation qui gère l'ordinateur.***

performance du programme réalisé : le temps d'exécution d'un programme en langage évolué sera plus élevé et la place mémoire utilisée plus grande que dans le cas d'un programme écrit en assembleur. Mais ce coût est en fait plus que compensé par le gain de temps considérable apporté par la facilité de mise en œuvre de ce même programme. Un programmeur qui pourrait, en quelques jours, écrire et rendre opérationnel un programme en FORTRAN mettrait peut-être plusieurs mois avant de mettre au point le même programme écrit en assembleur.

On peut, à titre d'exemple, comparer les différentes façons de coder une instruction simple dans ces langages. Prenons le problème consistant à calculer le prix de revient d'une commande. Le prix de vente unitaire d'un article est symboliquement appelé PU et le nombre d'objets commandés est N. Si le montant de la commande excède 1 000 F, une remise de 10 % est consentie au client. Il s'agit de calculer le montant final de la commande M.

En langage ALGOL, ceci s'écrirait :

$$M := PU * N * \quad \text{si } PU * N > 1000 \text{ alors } 0.8 \text{ sinon } 1.$$

En FORTRAN, plusieurs instructions seraient nécessaires :

$$M = PU * N \qquad IF\ (M \cdot GT \cdot 1000)\ M = M * 0.8$$

En APL enfin, nous aurions :

$$M \leftarrow M \times (1 + 0.2 \times 1000 < (M \leftarrow PU \times N))$$

Ces exemples montrent comment le même problème peut être différemment exprimé dans les langages évolués. Ils montrent aussi que la compréhension n'est pas évidente à la lecture d'un texte, bien qu'elle soit facilitée grandement par rapport à l'assembleur.

## Les systèmes d'exploitation

### Systèmes à monoprogrammation

L'exécution d'un programme écrit dans un langage évolué nécessite certains prétraitements. Tout d'abord le texte du programme doit être *compilé,* c'est-à-dire que la machine doit transformer chaque ordre évolué en toutes ses composantes en langage machine. Le programme obtenu, appelé *module-objet,* sera ensuite lié avec les différents sous-programmes dont il peut avoir besoin. On appelle cette phase *édition des liens.* La version définitive et exécutable par la machine est prête, le programme est alors installé en mémoire et exécuté. Il lit les cartes ou les informations dont il a besoin, les traite et sort les résultats attendus. Lorsque le texte d'un programme a été lu, sur le lecteur de cartes ou à partir d'une machine à écrire, il est rangé sur un support magnétique. Si une *erreur* survient, il est nécessaire de corriger les portions correspondantes du texte du programme. Pour cela, on utilise un programme appelé *éditeur de texte.* Souvent conversationnel, l'éditeur de texte permet de réaliser les commandes telles que : chercher dans le texte la séquence « TOTO » et la remplacer par « TATA » à chaque fois ou seulement une fois; insérer les phrases suivantes; changer un caractère par un autre; etc. Lorsque l'erreur est ainsi rectifiée, il est nécessaire de compiler le nouveau texte et de refaire une édition des liens. Lorsque le programme est jugé satisfaisant, il peut être ajouté aux modules déjà existants d'une *bibliothèque.* Pour cela, on utilise un programme, le bibliothécaire, qui permet de manipuler les textes d'autres programmes : il sert à ajouter un autre module, effacer un texte périmé, remplacer un programme par sa version plus récente. Il permet aussi de connaître la liste de tous les modules connus de la bibliothèque. Pour une utilisation souple de la machine, on a besoin de nombreux programmes. Chaque tâche devant être décrite avec précision, il est prudent d'écrire des programmes suffisamment généraux pour s'adapter à plusieurs cas par le simple ajustement de quelques paramètres.

Nous allons décrire maintenant les différents systèmes d'exploitation. Un système d'exploitation est un ensemble de programmes, en général fournis par le constructeur, qui décharge l'utilisateur de tâches ingrates ou routinières. Ainsi, sauf dans des cas très particuliers, le programmeur n'a pas à se préoccuper de la gestion des entrées-sorties, il utilise pour cela des macro-instructions ou des fonctions du système. D'autre part, le système d'exploitation coordonne les tâches confiées à la machine; il commande l'introduction en mémoire des programmes et veille à leur bon enchaînement; il s'occupe d'allouer les ressources du calculateur aux divers programmes (ces ressources désignent la place en mémoire centrale ainsi que l'accès aux différents périphériques demandés par l'utilisateur); il effectue certains contrôles, par exemple, sur le temps de calcul déjà utilisé par un programme, afin d'éviter qu'un programme qui boucle (c'est-à-dire qui fait sans arrêt le même travail) n'empêche un fonctionnement correct de l'ensemble. Il a la mission, dans certains cas, de donner le contrôle aux tâches les plus urgentes ou de façon périodique aux différents utilisateurs du calculateur.

Définissons maintenant les différentes fonctions et structures d'un système d'exploitation simple, appelé encore **moniteur.** Il est préparé sur un support intermédiaire (ruban papier ou plus souvent mémoire de masse), puis introduit en mémoire centrale au moment de l'initialisation (« bootstrap »). Dès lors, c'est lui qui va gérer toutes les commandes qui lui parviendront. Il sait reconnaître toutes les ressources qu'il a à sa disposition, que ce soient les périphériques et la mémoire centrale ou les différents programmes systèmes dont nous avons déjà parlé. Il reçoit toujours ses ordres de la console maîtresse et souvent, en plus, du lecteur de cartes et d'autres machines à écrire.

Voyons quelles sont les commandes nécessaires à l'exécution d'un programme utilisateur. Suivons pour cela un programmeur, disons Jean. Jean s'assied devant sa machine à écrire et signale sa présence en tapant sur le clavier son numéro d'ordre. En effet, quand Jean sera parti, d'autres usagers utiliseront la machine, et il est nécessaire de bien distinguer les différents utilisateurs. Le moniteur se chargera donc d'attribuer à tous les utilisateurs qu'il connaît une partie de ses ressources (disques) et y rangera les informations propres à chacun. Pour éviter que, par maladresse ou malveillance, les fichiers d'un programmeur ne soient détruits, chaque zone particulière peut être protégée par un mot de passe, associé au numéro d'ordre de l'utilisateur. Lorsqu'il a reconnu Jean, le moniteur se met en attente de ses commandes.

Supposons que Jean désire tout d'abord créer un fichier qui contiendra le texte de son programme; il frappe la commande EDI. Le moniteur le reconnaît et donne le contrôle à l'éditeur du texte qui, poliment, s'annonce en inscrivant un signe distinctif sur la machine à écrire. Jean lui indique alors le nom qu'il désire donner à son programme : ESSAI. Il entre ensuite à l'aide du clavier le texte correspondant. Quand ceci est terminé, Jean rappelle le moniteur pour compiler son programme. Si le langage utilisé est le FORTRAN, il frappe alors la commande FOR. Le moniteur charge en mémoire le programme de traduction d'un texte FORTRAN en langage machine. Jean donne l'ordre au compilateur de traiter le fichier ESSAI de façon à en faire une suite d'instructions assimilables par la machine.

Ensuite, l'appel de l'éditeur de liens par l'ordre LIE donnera à Jean la possibilité d'utiliser les fonctions du système ou de sous-programmes personnels. Par exemple, il est possible en FORTRAN, et dans bien d'autres langages évolués, de calculer la racine carrée d'un nombre X en écrivant simplement SQRT (X). (SQRT est l'abréviation des mots anglais « Square Root » signifiant racine carrée.) Pour le compilateur FORTRAN, cette suite de caractères correspond à l'appel d'une tâche particulière capable de calculer cette racine. Cette tâche, écrite en général par le constructeur, est fournie avec bien d'autres dans une bibliothèque FORTRAN. Le compilateur ne se préoccupe pas de cette bibliothèque; c'est l'éditeur de lien, qui, lui, connaît son existence et sa composition, qui aura pour mission d'ajouter, derrière celles de l'utilisateur, toutes les séquences d'instructions qui correspondent à ces tâches.

L'édition des liens étant terminée, Jean lance l'exécution de son programme. Il est bien rare qu'un programme soit opérationnel au premier essai : des erreurs peuvent avoir été commises, soit dans la syntaxe du texte en langage évolué, soit dans sa logique. C'est pourquoi, après avoir détecté quelques erreurs, Jean rappellera l'éditeur de texte pour corriger son programme. Il recommencera ensuite toute la procédure que nous venons de décrire jusqu'au moment où son programme lui fournira les résultats qu'il en attend.

Nous venons de décrire un *moniteur conversationnel*. La logique est la même dans le cas d'un moniteur tirant ses directives du lecteur de cartes. Dans ce cas, on parle de *« trains de travaux »* ou *« batch processing »*. En effet, le moniteur va lire les ordres à exécuter sur le lecteur de cartes, et il les traite les uns à la suite des autres jusqu'à ce que toutes les cartes aient été lues. Cette façon de travailler a pour avantage d'obtenir un meilleur rendement de la machine. Dès qu'un travail est terminé, le moniteur enchaîne sur le suivant; il n'y a pas de temps mort, dû par exemple à une hésitation devant la machine à écrire ou encore à la lenteur de la frappe humaine. Paradoxalement, les délais sont plus longs du point de vue de l'usager. Alors que l'ordinateur répond immédiatement en conversationnel, un délai assez long peut s'écouler entre le moment où l'utilisateur donne ses cartes à l'opérateur et celui où il reçoit le listing comportant les résultats. La rentabilisation d'un système « trains de travaux » nécessite en effet la présence d'opérateurs et d'une organisation qui sont plus contraignants. Les préoccupations qui justifient l'une ou l'autre utilisation de la machine sont très différentes dans les deux cas. Nous verrons que les systèmes plus gros et plus évolués permettent d'employer simultanément ces deux modes de travail.

## Systèmes à multiprogrammation

Un inconvénient majeur des systèmes à monoprogrammation est la perte de temps occasionnée par les entrées-sorties. Si un programme a besoin pour travailler de l'information contenue sur une carte ou sur un disque magnétique, il demande la lecture correspondante et attend qu'elle soit terminée. Ce temps d'attente est inemployé; pour l'utiliser de façon constructive, on fait appel à la multiprogrammation. Le principe de cette méthode est d'entrer plusieurs programmes en mémoire et de permettre l'utilisation des temps morts d'un programme par les autres. Imaginons, par exemple, que deux programmes P1 et P2 sont installés en même temps dans la mémoire centrale. Si P1 demande une entrée ou une sortie sur un périphérique, le système donnera le contrôle à P2 qui pourra travailler. Lorsque l'échange demandé par P1 sera terminé, le contrôle sera rendu à P1 jusqu'à la prochaine entrée ou sortie d'information. Les différentes grandes familles de systèmes à multiprogrammation se distinguent par la façon de donner le contrôle aux différents programmes demandeurs.

### Le moniteur temps réel

La loi d'allocation de la mémoire centrale d'un tel système est la priorité. Plusieurs tâches sont installées, attendant pour être activées une interruption du périphérique qui leur est associé ou de l'horloge. C'est le contexte extérieur qui agit. L'ordinateur a pour mission de traiter, lorsqu'ils surviennent et suivant leur priorité, les événements provenant du monde extérieur. Il doit apporter une réponse à la question posée dans un temps très court. L'utilisation de ces systèmes couvre aussi bien les domaines industriels (commande de processus de toutes natures, surveillances) que certains domaines de la gestion (réservation de places en temps réel pour les trains ou les avions, gestion de stocks, documentation en ligne). Lorsque toutes les tâches sont inactives, l'ordinateur est utilisé pour traiter les programmes des utilisateurs en « batch » ou en conversationnel. A l'échelle de temps humaine, l'ordinateur semble travailler pour tous les usagers simultanément. Cependant, de temps à autre, l'utilisateur perçoit un temps d'attente. Cela se produit lorsque la machine doit effectuer des tâches plus prioritaires.

### Le moniteur temps partagé

Dans ce type de multiprogrammation très orienté pour le mode conversationnel, tous les utilisateurs ont la même priorité; le système leur alloue une fraction de temps à tour de rôle, mais comme l'utilisateur humain a des temps de réponse élevés par rapport à la machine, il ne s'en rend absolument pas compte : pour lui, la machine répond aux questions posées avec promptitude. Des problèmes de délai se posent cependant, lorsque le nombre d'utilisateurs connectés à une même machine devient trop élevé. Il se produit alors un phénomène de saturation, et les performances du système s'effondrent.

### Évolution du moniteur train de travaux

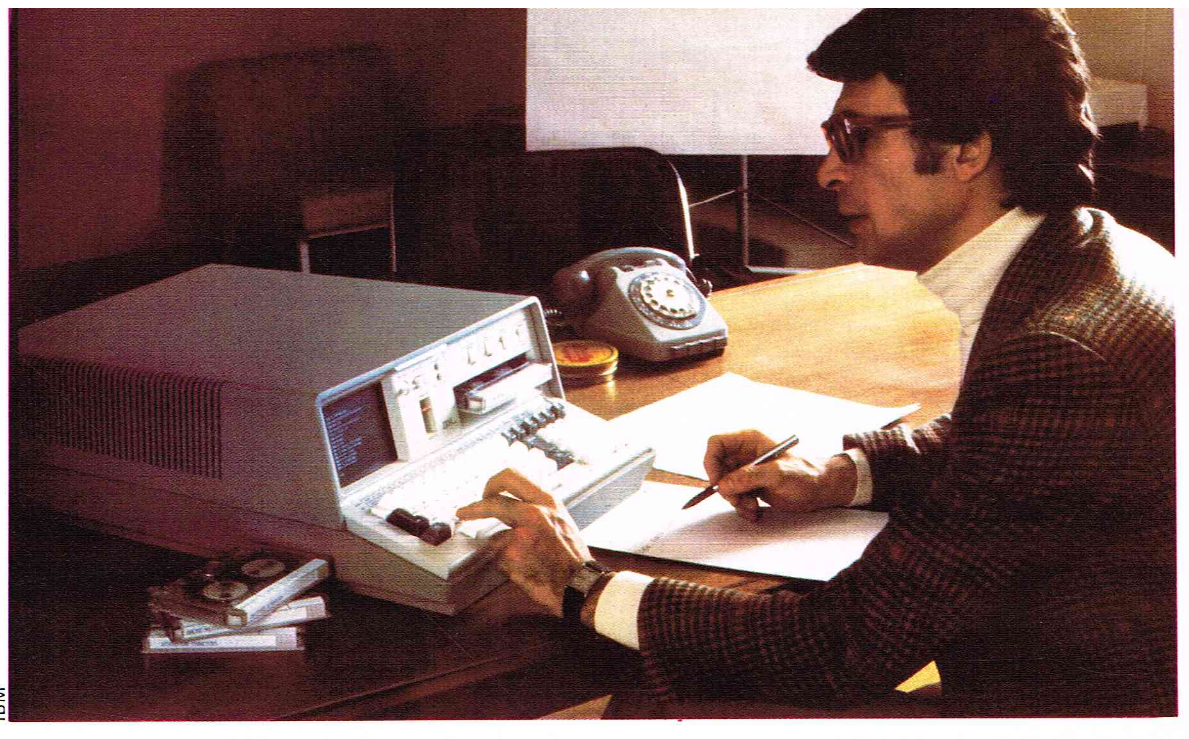
La logique du traitement par train de travaux n'est pas modifiée par la multiprogrammation. En revanche, la façon de procéder du système n'est plus la même. Deux tâches spéciales, nommées « spooler », sont créées et ont pour but de gérer les entrées-sorties des deux périphériques principaux de ce genre d'application : le lecteur de cartes et l'imprimante. La tâche affectée au lecteur de cartes est mise en route et un prétraitement élémentaire est effectué. Dès que toutes les informations nécessaires sont rassemblées, cette tâche alerte le moniteur qui peut commencer son travail. Celui-ci aura un rendement accru, puisqu'il n'aura jamais à attendre la lecture d'une carte. Le même mécanisme est adopté en sortie. Les programmes écrivent leurs résultats sur le disque, et la tâche associée à l'imprimante se charge d'éditer ces lignes. L'avantage de ce système réside dans le fait que les programmes sont affranchis des délais inhérents aux périphériques lents et ont donc un meilleur rendement. Les périphériques sont utilisés au mieux puisqu'ils travaillent toujours à leur vitesse maximale. Enfin plusieurs programmes peuvent utiliser simultanément la même imprimante sans risques de conflit : les lignes qu'ils veulent imprimer sont écrites sur disque, et le « spooler » les édite tour à tour, sans qu'il y ait risque de chevauchement.

Les différentes multiprogrammations que nous venons de voir ne peuvent être opérationnelles efficacement que sur des ordinateurs de taille et de performances suffisantes.

# La micro-informatique

Le terme de micro-informatique englobe à la fois les micro-ordinateurs et les microprocesseurs. Le préfixe « micro » évoque avant tout une volonté de réduction de volume; il s'agit plutôt d'une évolution de la technologie fondamentale. On définit un microprocesseur comme étant formé d'un ou de plusieurs circuits intégrés de très grande complexité, réalisant les fonctions d'une unité centrale classique, telle que nous l'avons décrite auparavant. Un micro-ordinateur est un ordinateur construit autour d'un microprocesseur; par conséquent, son prix est très réduit. Le marché de ces composants est donc ouvert sur les applications où les performances nécessitées ne sont pas très élevées, non plus que le budget alloué.

Un bouleversement s'est produit dans la mentalité des informations depuis l'avènement de la micro-informatique. La tendance à concentrer tous les « pouvoirs » et les informations entre les circuits d'une seule super-machine très puissante, très chère et très fragile par son unicité, se transforme petit à petit en une volonté de décentralisation. Un niveau de décisions élémentaires est d'abord constitué par des machines de faibles coûts et performances, réservant pour une machine centrale plus



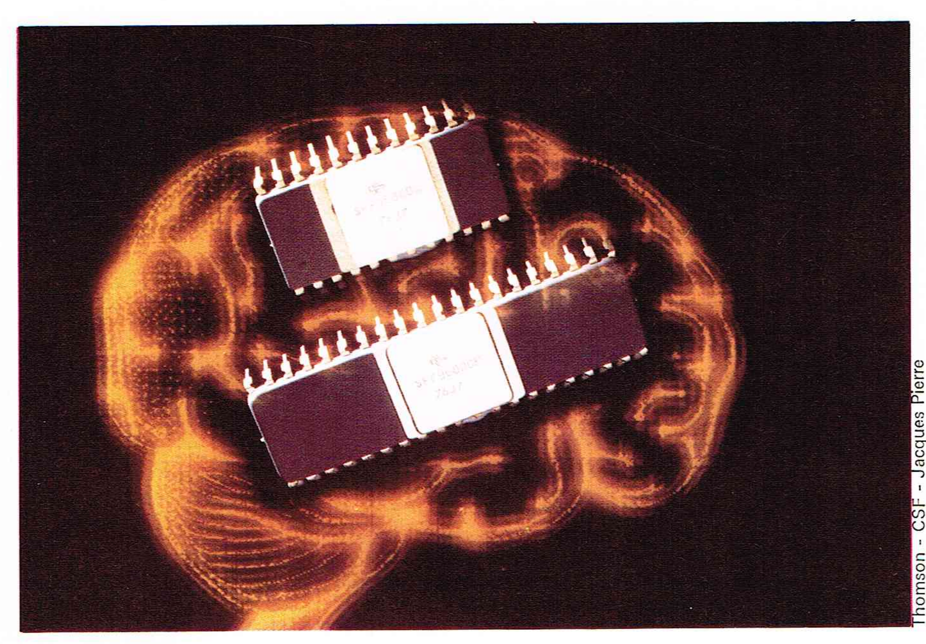
▶ *Le micro-ordinateur IBM 5100; cet appareil comporte un clavier, un petit écran cathodique incorporé et utilise les bandes magnétiques sous forme de minicassettes comme support d'information. Réalisé autour d'un microprocesseur, ce type d'ordinateur présente l'avantage d'être de petite taille, portable, et d'être accompagné d'une bibliothèque de programmes.*

IBM

puissante les problèmes plus complexes ou demandant une plus grande quantité d'informations. Les pannes de la machine centrale ne sont plus alors ressenties comme la catastrophe qui immobilise tout le service informatique, mais comme un accident qui laisse subsister les « arcs-réflexes » au niveau des micromachines frontales. Dans une usine, par exemple, les contrôles et les commandes élémentaires des processus en fonctionnement seraient assurés dans des conditions de sécurité normale. Les statistiques et l'optimisation de plus haut niveau seraient suspendues pendant la durée de la panne. De plus, si la sécurité l'exige, plusieurs micro-ordinateurs peuvent être mis en parallèle pour une même fonction, du fait de leur faible coût.

Quels sont les marchés privilégiés du microprocesseur? Il sert tout d'abord à remplacer dans certains cas la logique câblée des ordinateurs. En effet, celle-ci est calculée et réalisée une fois pour toutes; elle peut exiger un grand nombre de composants et donc être onéreuse; enfin elle est figée et n'offre guère de souplesse d'utilisation. A l'inverse, le microprocesseur est d'un emploi très souple, car la logique qu'il remplace est élaborée par programmation. Les micro-instructions permettent une mise en place ou des modifications aisées et rapides. Le microprocesseur sort maintenant du marché informatique pour s'installer dans l'électroménager (machines à laver, cuisinières programmables, etc.), les machines à calculer diverses et les affichages numériques (appareils de mesure, montres)... L'avenir qui lui est offert est encore difficile à définir de façon précise, mais s'annonce brillant. On peut citer, parmi quelques réalisations dont il est le centre : la conduite de machines-outils de processus industriels; la centralisation et la répartition d'informations; l' « intelligence » de certains terminaux, comme les caisses enregistreuses ou les cartes de crédit, la réalisation d'interfaces souples en informatique. Il est aussi très utilisé dans les télécommunications, dans la régulation du trafic routier par commande des feux de signalisation, dans le traitement automatique de signaux.

▼ *Un microprocesseur de technologie* **MOS** *fabriqué par Sescosem. Il s'agit d'un circuit intégré ou d'un ensemble de circuits de très grande complexité réalisant les fonctions d'une unité centrale classique.*



Thomson - CSF - Jacques Pierre

## *Les applications de l'informatique*

On peut distinguer trois grands secteurs d'activité de l'informatique. Le plus important à l'heure actuelle est celui de la **gestion.** Les machines utilisées sont souvent puissantes, les périphériques nombreux, car les informations traitées sont volumineuses. Cela implique la réalisation d'une organisation rigide autour de l'ordinateur et la création d'emplois spécialisés : pupitreurs, opérateurs dans la salle machine; préparateurs et bandothécaires chargés de la prise en compte des informations des utilisateurs; les résultats fournis par la machine sont répartis par un service spécial (« dispatching ») aux personnes concernées. Les différents programmes traités par la machine ont été réalisés par une équipe. Le chef de projets définit avec le client les buts de l'application, les moyens mis à la disposition, les informations traitées. L'analyste organise de façon plus informatique le traitement correspondant et le découpe en unités fonctionnelles. Il donne une présentation définitive (format) aux données qui seront utilisées dans les chaînes de traitement. Le programmeur, à partir de ces cahiers des charges, écrit et met au point les différents programmes nécessaires. Il utilise généralement un langage évolué (COBOL, PL1).

Les applications classiques de la gestion sont : la facturation, la paye, la gestion des stocks, la comptabilité et les statistiques. La *facturation* a été une des premières utilisations de l'ordinateur : il s'agit d'établir automatiquement les factures à envoyer aux clients de l'entreprise. La facturation demande la manipulation de fichiers volumineux, ce qui se prête parfaitement à l'automatisation. Les traitements sont bien formalisés. L'ordinateur joue pleinement son rôle, puisqu'il est capable de retrouver très vite dans des fichiers de grande taille les informations utiles et d'effectuer sur elles des traitements routiniers.

La *paye* pose un problème d'un autre ordre. Sur le plan informatique, il s'agit là aussi d'une manipulation de dossiers et de calculs sur les valeurs obtenues. Mais l'aspect social est très important; une sécurité absolue doit donc être mise en place tant pour la rigueur des traitements que pour la conservation des dossiers. Le secret doit être gardé.

De même que les prix évoluent dans le cas de la facturation, les salaires changent aussi; il est donc nécessaire de prévoir une mise à jour constante des informations contenues dans différents fichiers. Les mouvements




◀ ***Parmi les grands secteurs d'activité de l'informatique, celui de la gestion est le plus important. Les machines sont souvent puissantes et le personnel nombreux.***

de personnel doivent aussi pouvoir être pris en compte aisément par la machine.

La *gestion de stocks* consiste à permettre aux responsables de connaître en temps utile l'état des réserves des produits qu'ils utilisent. Chaque mouvement de marchandises doit être appréhendé et pris en compte immédiatement. De la même manière, les réapprovisionnements sont saisis. La gestion de stocks peut aller plus loin. Par des méthodes prévisionnelles appropriées, l'ordinateur peut donner une estimation plausible des dates de commande de nouveaux produits ; cela évite de se trouver démuni face à la demande de la clientèle, mais sans pour autant augmenter les réserves dans des proportions trop fortes, à cause des coûts de stockage et de la fragilité des marchandises périssables. Dans certains magasins, les caisses enregistreuses sont directement connectées à un ordinateur qui peut organiser le garnissage des rayons et préparer automatiquement les bons de commande pour les fournisseurs.

Certaines phases de la *comptabilité d'une entreprise* sont aisément automatisables, c'est un domaine où la rapidité de l'ordinateur est précieuse et permet de réaliser des tâches monotones. De nombreuses *statistiques* peuvent être aussi élaborées par ordinateur. Des applications intégrées telles que la *gestion automatique* et le *contrôle de production* se développent de plus en plus. Les renseignements divers donnés par la machine permettent aux responsables de prendre des *décisions* en meilleure connaissance de cause.

Les techniques de transmission de données permettent à des terminaux très éloignés d'être connectés à un ordinateur gérant une base de données. C'est ainsi que sont rendues possibles les manipulations d'informations communes à plusieurs entreprises ou filiales. La réservation de places d'avions et de trains fonctionne de cette façon.

L'*enseignement assisté par ordinateur* et la *gestion en temps réel* sont quelques-unes des multiples activités rendues possibles par la téléinformatique et par la concentration d'informations en bases de données.

Un deuxième grand secteur de l'industrie informatique se situe dans le **monde industriel.** L'endurance d'un ordinateur est très grande et permet une surveillance constante des processus les plus compliqués. La prise de décisions immédiates peut lui être confiée dans les cas d'urgence. Des écrans cathodiques ou des machines à écrire fournissent un état constant du système. L'opérateur agit à un niveau supérieur en donnant les consignes et en indiquant les procédures d'urgence.

La *commande de machines-outils automatiques* est aussi effectuée à l'aide d'ordinateurs qui, à partir de plans et d'ordres divers, calculent les différentes cotes de la pièce, prévoient tous les mouvements nécessaires de la machine-outil pour sa confection et les font exécuter.

Le troisième secteur d'activité de l'informatique se situe dans le **domaine scientifique.** Contrairement à la gestion, l'accent dans ce cas est mis sur les calculs et les traitements en mémoire centrale plus que sur les manipulations de données volumineuses. Une des applications les plus spectaculaires est le *calcul de trajectoires des satellites* et autres sondes spatiales, ainsi que leur télécommande.

Les *applications biomédicales* se développent. Une recherche importante est faite pour aider les praticiens dans leurs diagnostics.

Loin de vouloir substituer l'ordinateur à l'homme, on cherche à l'utiliser pour évaluer des quantités difficiles à saisir précisément par l'homme (fréquences en particulier). Les modélisations de systèmes et leur identification supposent parfois la résolution simultanée de centaines d'équations, que l'homme ne peut résoudre de façon satisfaisante : une heure de calcul d'une machine puissante représente des mois de travail d'une équipe de plusieurs hommes dans ce cas. Bien sûr, la position du problème ne peut pas, à l'heure actuelle, être laissée à l'initiative de la machine.

La *simulation* permet d'envisager ce qui se passerait si certaines conditions se produisaient. Ainsi, certaines expériences peuvent être simulées sur l'ordinateur avant d'être tentées réellement, ce qui évite des destructions ou des gaspillages au cas où l'évolution du processus n'est pas satisfaisante. Cela permet aussi un accroissement de la sécurité dans les études de ponts, d'automobiles, de résistance de matériaux.

Les développements des dispositifs graphiques ajoutent encore à la souplesse d'utilisation de l'informatique. Suivant les consignes qu'il donne, l'architecte suit, sur son écran de visualisation, l'évolution de l'autoroute ou de l'immeuble qu'il élabore. Dans le domaine de la création artistique, l'ordinateur est aussi utilisé, particulièrement dans la peinture et la musique.

L'évocation des possibilités énormes de l'informatique permet de constater que cette science est sortie de l'enfance. Cependant, son caractère reste encore fragile, et son adolescence passe par une prise de conscience. L'ordinateur n'est pas un dieu ; mais c'est un outil très puissant qui ne doit pas être sous-estimé. Une standardisation et un assouplissement considérable de son utilisation conduiraient les informaticiens à sortir du domaine trop étroit où les cantonnent le jargon informatique et une technicité asservissante. L'informatique sera adulte quand elle sera utile à tous et utilisée par tous.

## BIBLIOGRAPHIE

LILEN H., *du Microprocesseur au micro-ordinateur*, Éd. Radio, 2e édition, 1976. - MATHELOT P., *l'Informatique*, Que sais-je ? no 1371, P.U.F., 3e édition, 1975. - MEINADIER J.-P., *Structure et fonctionnement des ordinateurs*, Série informatique (Sciences humaines et sociales), Larousse, 1971. - POULAIN P., *Éléments fondamentaux de l'informatique. Les Ordinateurs*. Université et technique, Dunod, 1972.

▶ *Intérieur d'une cabine de prise de son au studio d'enregistrement des Dames, à Paris.*




J. Bordas - Fotogram

# RADIODIFFUSION

## Historique

En 1887, H. Hertz provoque à partir d'une étincelle électrique les oscillations haute fréquence prévues par le théoricien J. C. Maxwell, et, en 1890, Édouard Branly découvre le « cohéreur » permettant de détecter ces ondes électromagnétiques. Cinq ans plus tard, A. Popov invente l'antenne. Dès lors, tout est prêt pour le développement de la télégraphie sans fil (signaux codés) et, en 1910, un premier poste militaire à étincelle est installé, utilisant la tour Eiffel comme support d'antenne. La même année, Pickard, aux États-Unis, invente le détecteur à galène ; trois ans plus tôt, Lee de Forest avait eu l'extraordinaire idée de la lampe à trois électrodes fondée sur la diode de Fleming et permettant la réalisation d'amplificateurs et d'oscillateurs.

Mais c'est en février 1921 que le phénomène de la radiodiffusion prend en France toute sa signification avec la naissance de la téléphonie sans fil : ce sont, dès juin 1921, les premiers radioconcerts et les premiers journaux parlés. L'emploi de la lampe amplificatrice se généralise, et l'écouteur se transforme progressivement en un véritable haut-parleur, tandis que la puissance des émetteurs atteint quelques kW. La conception du récepteur est déjà tout à fait semblable à celle d'un poste moderne. On assiste alors à la naissance de l'industrie de la radio. Les émetteurs se multiplient et, dès 1930, certains rayonnent une puissance de 100 kW. La création de centres d'émissions en ondes décamétriques permet d'atteindre les pays éloignés, et la Seconde Guerre mondiale éclate alors que les grandes nations terminent des réseaux destinés à assurer une diffusion sur l'ensemble de leur territoire. L'après-guerre concrétise l'essor industriel par une accélération du progrès technologique (réduction considérable de l'encombrement et de la consommation du matériel). L'utilisation du transistor permet vers 1950 la fabrication des premiers postes portatifs. L'option fondamentale de la radiodiffusion, tant sonore que télévisée, est de s'adresser au grand public, avec pour conséquence la course aux fortes puissances et aux hautes fréquences à la limite de la technologie du moment. Enfin, la qualité du son est améliorée de façon presque définitive par la modulation de fréquence et la stéréophonie (« tuners » haute fidélité).

En France, la radiodiffusion est un service public, et un monopole d'État. La loi interdit la construction d'émetteurs sur le territoire national, mais rien n'empêche les ondes électromagnétiques de franchir les frontières : des émissions privées (radios périphériques) peuvent être captées par les postes de commerce. La vigilance de l'État et la concurrence n'ont laissé subsister qu'un petit nombre de postes émetteurs, dont les budgets sont tous importants : leur puissance d'information ( «media ») et les intérêts mis en jeu font que, même si les motivations sont à l'origine différentes, radio d'État et radios privées présentent de nombreux points communs.

Les émetteurs à diffusions restreintes (radios amateurs) sont soumis aux lois sur les télécommunications qui interdisent toute transmission privée qui pourrait être assurée par les P. et T. Malgré cette limitation, la radio d'amateur trouve de nombreux adeptes. Nous lui devons d'avoir attiré l'attention sur les propagations extraordinaires des ondes courtes. Le parc national d'appareils récepteurs de radiodiffusion compte environ 14 millions de postes, dont un million et demi est recensé, et le nombre des récepteurs équipés de la modulation de fréquence ne cesse d'augmenter.

Malgré la sévère concurrence de la télévision, la « radio » restera sans doute encore très longtemps un moyen privilégié d'information, de divertissement, et, dans certains cas, de culture.

## Généralités

La *radiodiffusion sonore* est la transmission à distance du son par voie hertzienne.

L'information à transmettre est une onde sonore (bruit, parole ou musique). Cette onde crée une variation de la pression de l'air que détecte un microphone ; celui-ci délivre une tension électrique, proportionnelle à la pression acoustique, qui sert à moduler une caractéristique (de façon générale, l'amplitude ou la fréquence) de l'onde électromagnétique rayonnée par l'émetteur. Le récepteur détecte les variations de cette caractéristique qu'il met sous la forme d'une tension proportionnelle à la modulation initiale. Enfin, un autre transducteur électro-acoustique (haut-parleur, écouteur) transforme cette tension en une pression acoustique proportionnelle au son original.

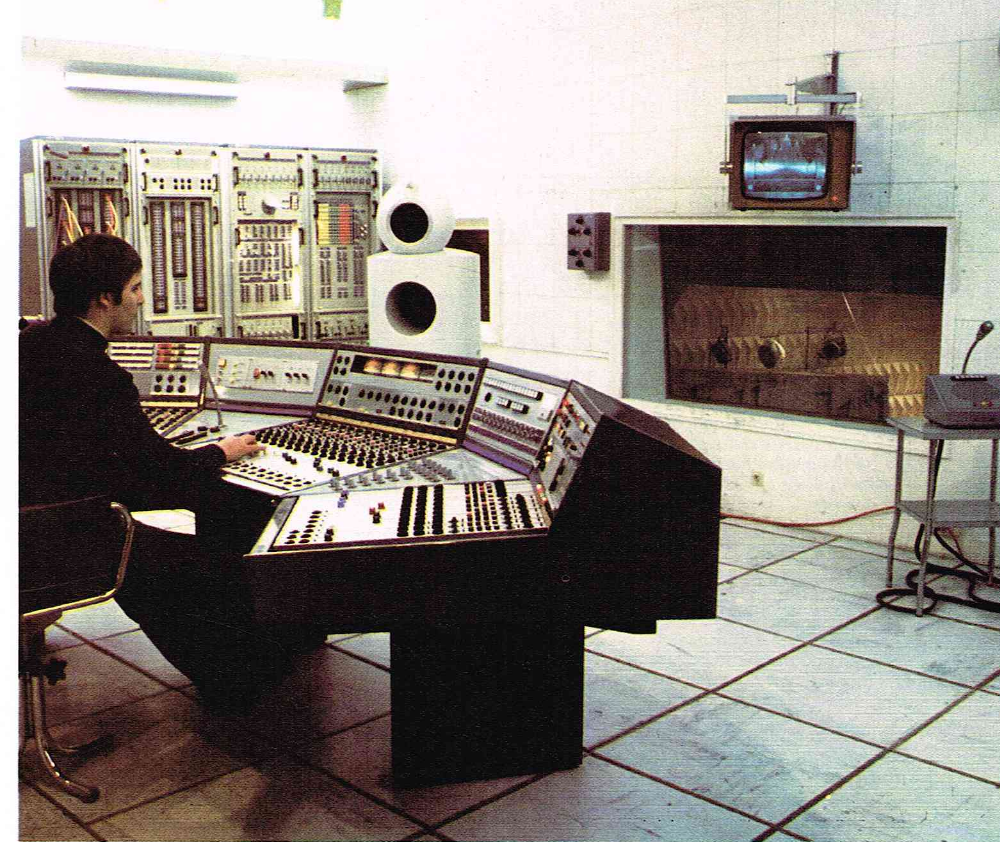
Les programmes sont souvent enregistrés avant d'être diffusés. Les studios radiophoniques sont des salles acoustiquement étudiées (isolation, réverbérations par les parois), d'un volume compris entre quelques dizaines et plusieurs milliers de mètres cubes. Le preneur de son effectue divers réglages dans la cabine technique, voisine du studio et en communication visuelle avec lui (mélanges avec des passages enregistrés, modification et correction du son, effets spéciaux...).

Ce programme est envoyé dans une « cabine de programme », et le programme final est composé à l'aide

des différentes séquences qui lui parviennent. Annonces et programmes d'attentes (disques, passages enregistrés) proviennent d'un studio spécialisé.

Un centre de modulation (CDM) permet la commutation à l'intérieur d'un réseau entre les divers émetteurs et cabines de programme. Les liaisons sont assurées par câbles téléphoniques ou par des voies hertziennes réservées en ondes centimétriques.

La production radiophonique met à profit deux possibilités essentielles et complémentaires : l'instantanéité du reportage et l'enregistrement, qui sont respectivement la vie et la richesse d'une émission. Le reportage instantané s'est progressivement évadé du studio avec l'amélioration de la technique. De son côté, l'enregistrement a accru les possibilités, et finalement la qualité de la production. Utilisé pendant plus de dix ans à cet effet, le disque souple (en aluminium verni, il n'admettait que quelques passages) a joué un rôle considérable dans l'évolution des structures radiophoniques. Actuellement, et depuis son invention, le magnétophone le remplace avec une fidélité et une commodité d'utilisation inégalées. En contrepartie, la radiodiffusion risquait, ces dernières années, de perdre de sa fraîcheur en cédant à cette facilité : on constatait jusqu'à 80 % de programmes à base d'enregistrements. Cette proportion est actuellement en diminution.


Radio - France



Radio - France

▲ ***Deux vues des studios d'enregistrement de Radio-France; en haut, la régie du studio 104 (enregistrements réalisés dans le grand auditorium); en bas, la régie du studio 134 avec, à l'arrière-plan, une interview dans la cabine de prise de son.***

## *Propagation des ondes radio-électriques*

Le support de l'information entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception est une onde électromagnétique (onde porteuse).

Tout comme l'air propage les ondes sonores, la mer les ondes de la houle, le vide ou l'air (et en général n'importe quelle région de l'espace) est capable d'assurer la propagation d'un champ électromagnétique. Comme pour tout phénomène ondulatoire, on peut lui attribuer une amplitude, une fréquence, une longueur d'onde et une vitesse. Fréquence $f$, longueur d'onde $\lambda$ et vitesse $c$ sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. Observées en un point fixe de l'espace, leurs amplitudes varient sinusoïdalement avec la fréquence $f$ et sont proportionnelles; ce qui explique qu'en radio-électricité le champ électromagnétique est traditionnellement caractérisé par la valeur du champ électrique.

La vitesse $c$ ne dépend pratiquement pas de la fréquence, elle est donc la même pour toute onde électromagnétique; en particulier, $c$ est la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s).

En radiodiffusion, on caractérise souvent l'onde par sa longueur plutôt que par sa fréquence. Les domaines de longueurs d'onde et leur dénomination sont les suivants :

— ondes kilométriques : de 2 à 1 kilomètre (anciennes « grandes ondes ») ;

— ondes hectométriques : de 571 à 120 mètres (anciennes « petites » et « moyennes » ondes) ;

— ondes décamétriques : de 93,75 à 13,5 mètres (anciennes « ondes courtes ») ;

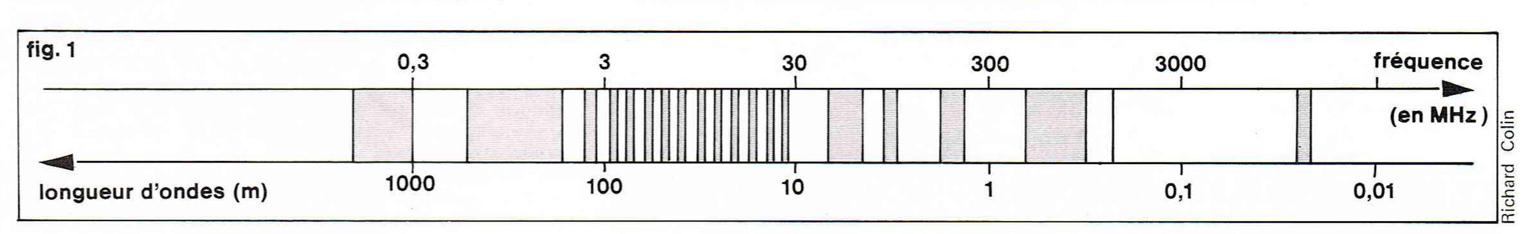
— ondes métriques : de 7,32 à 1,39 mètre (anciennes « VHF ») ;

— ondes décimétriques : de 64 à 31 centimètres;

— ondes centimétriques : de 2,56 à 2,36 centimètres.

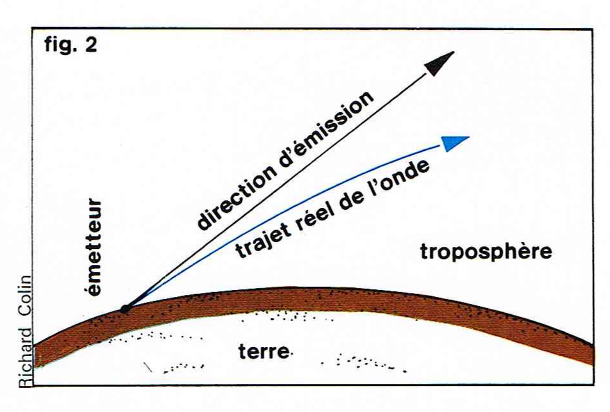
Des accords internationaux délimitent des « canaux » à l'intérieur de ces bandes de fréquence (*fig.* 1).

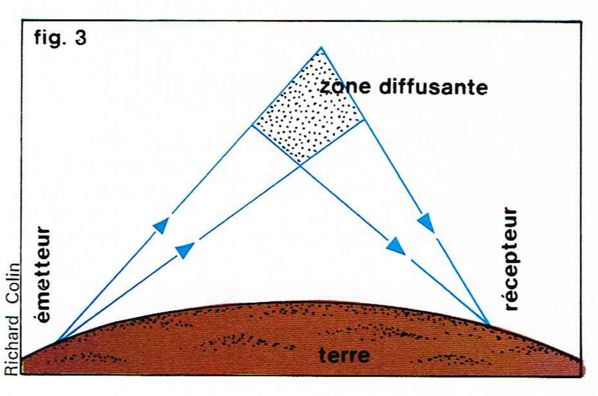
▼ ***Figure 1 : les différents canaux attribués à la radiodiffusion.***



▶ *Figure 2 : le phénomène de réfraction par l'atmosphère ; l'indice de réfraction de la basse atmosphère décroît avec l'altitude, et il en résulte une courbure de la trajectoire du rayonnement électromagnétique. Figure 3 : le phénomène de diffusion par l'atmosphère. Les turbulences atmosphériques et de petites discontinuités de l'indice de réfraction sont à l'origine d'une réémission partielle des ondes métriques et inférieures.*

▼ *Figure 4 : le phénomène de réflexion sur l'ionosphère ; il existe un angle limite $\alpha_0$ au-delà duquel il n'y a plus réflexion (sin $\alpha_0$ est inversement proportionnel à la longueur d'onde). Pour une longueur d'onde donnée, il existe donc entre l'émetteur et le récepteur une « zone de silence » que l'onde réfléchie ne peut atteindre. Ce terme de « zone de silence » n'a de sens que pour les ondes courtes dont la propagation directe est négligeable ; en onde longue, cette zone est couverte par l'onde directe. Figure 5 : le phénomène de « fading » ; dans le cas des ondes hectométriques, le rayonnement pénètre dans la zone de réflexion où l'interférence des deux champs provoque d'importantes perturbations de la réception.*




Si, en champ libre, la propagation des ondes ne dépend pas de la fréquence, ce n'est plus le cas en présence d'obstacles : une onde ne « voit » un objet que si les dimensions de celui-ci atteignent la longueur d'onde. Ainsi, un objet intercepte la lumière et devient visible dès que sa dimension est supérieure à un demi-micron, alors que les murs d'un bâtiment sont parfaitement transparents pour une onde radio kilométrique.

L'onde se propage à peu près comme une onde libre si, d'une part, dans sa direction de propagation, elle ne rencontre aucun obstacle entre l'émetteur et le récepteur, et si, d'autre part, elle reste éloignée des obstacles d'au moins une dizaine de longueurs d'onde : pour les émetteurs terrestres, cette condition n'est réalisée que par les longueurs d'onde métriques et inférieures, et lorsque l'émetteur est visible du récepteur. Une autre méthode d'émission consiste à rayonner parallèlement au sol : ce dernier absorbe l'onde d'autant plus rapidement qu'il est moins conducteur et que la longueur d'onde est courte. C'est pourquoi la radio a débuté avec les ondes myriamétriques (10 km).

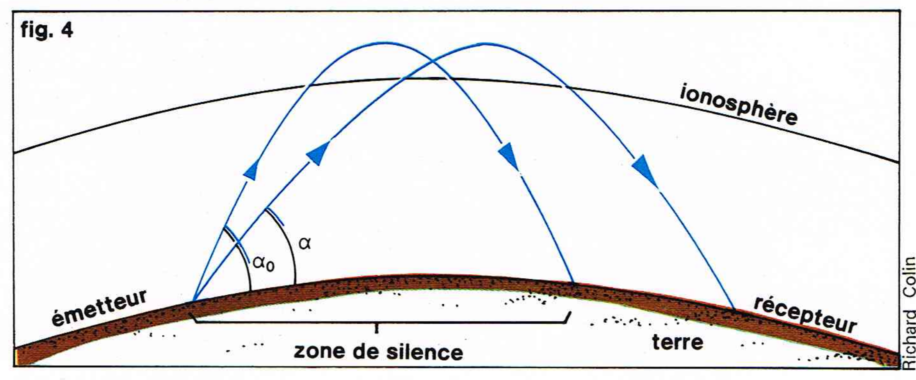
Il ne faut pas confondre ce type de propagation avec la propagation directe : par exemple, le milieu marin (bon conducteur) est impropre à la transmission radio-électrique (entre sous-marins par exemple), mais il guide l'onde à sa surface avec une faible absorption.

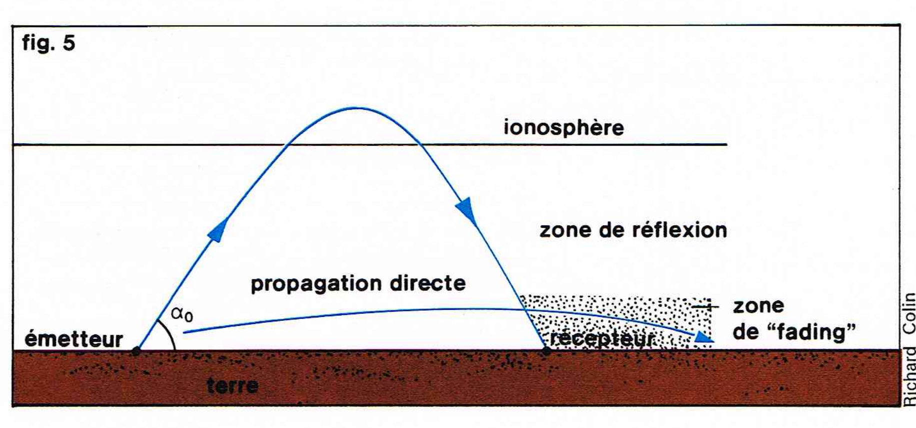
Outre ces deux types de transmission, on observe des réfractions, diffusions et réflexions dues à l'atmosphère : les propriétés électromagnétiques de l'air sont voisines de celles du vide, mais, sur de larges distances de propagation, certains effets peuvent prendre de l'importance. Ainsi, l'indice de réfraction de l'atmosphère dépend de l'altitude : l'onde ne se propage plus en ligne droite. Pour le calcul des distances de propagation, on peut montrer que tout se passe comme si la trajectoire était rectiligne et le rayon terrestre multiplié par 4/3 (*fig.* 2).

Pour certaines fréquences (ondes métriques), les phénomènes de diffusions par les inhomogénéités de l'air deviennent sensibles : la région de l'atmosphère « éclairée » par l'onde rayonne à son tour une partie de l'onde vers la terre (*fig.* 3). Enfin, la haute atmosphère possède des propriétés électriques et magnétiques agissant sur l'onde : les ondes suffisamment longues sont réfléchies à quelques centaines de kilomètres d'altitude par l'ionosphère et renvoyées sur la terre. Très affaibli pour les plus grandes longueurs d'onde, ce phénomène n'est sensible que pour les ondes moyennes (dont l'affaiblissement est lui-même beaucoup plus important le jour que la nuit) et pour les ondes décamétriques (qui sont peu affaiblies) ; lorsqu'il y a réflexion, les émissions en ondes décamétriques peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres (*fig.* 4).

Si le récepteur reçoit à la fois l'onde directe et l'onde réfléchie (dont le retard est lentement variable en fonction des perturbations de l'ionosphère), leur interférence provoque le phénomène du « fading » (variation périodique du niveau de réception), insensible dans les postes modernes, dont le niveau est automatiquement maintenu constant (CAG) [*fig.* 5].

La connaissance des phénomènes de propagation sur terre est essentielle pour l'exploitation des réseaux d'émetteurs. L'étude en a été longue et difficile (statistiques journalières, saisonnières, et même décennales). L'utilisation des réémetteurs sur satellites, qui bouscule un peu les données du problème, se révèle de plus en plus intéressante.



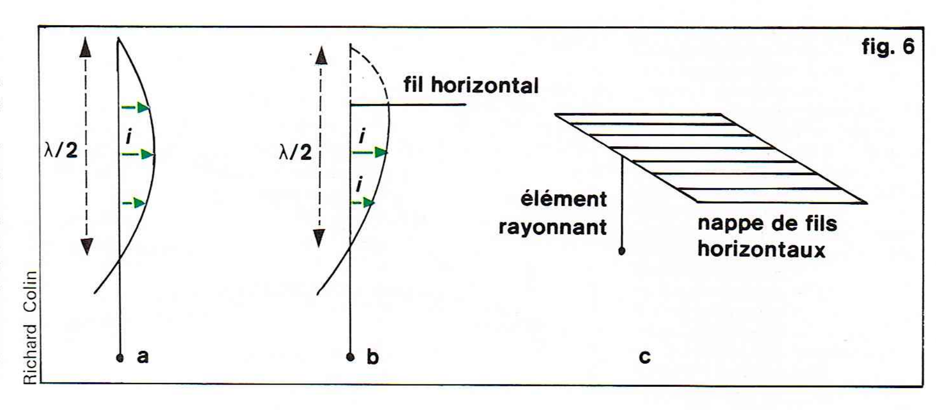

## *Production des ondes électromagnétiques*

Il existe de nombreuses sources naturelles d'ondes radio-électriques : la plus connue, pour son effet désastreux sur l'écoute des émissions en modulation d'amplitude, est l'éclair de l'orage. C'est justement par une étincelle plus modeste qu'a débuté la radio-électricité. Mais, contrairement à l'optique, dont la période « cohérente » vient de débuter avec la réalisation du laser, la radio-électricité a rapidement bénéficié de sources de plus en plus cohérentes, c'est-à-dire capables de produire des ondes de fréquence et de phase déterminées, augmentant ainsi considérablement la densité d'information transportable par l'onde.

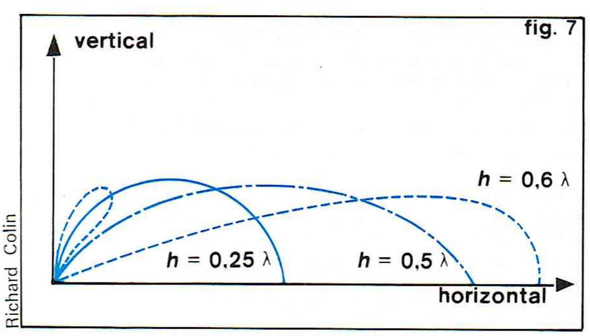
Pour rayonner une onde électromagnétique avec un rendement suffisant, il est nécessaire de faire circuler un courant de haute fréquence dans un *circuit d'antenne* dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde. Chaque élément du circuit d'antenne parcouru par le courant alternatif rayonne un champ électromagnétique dont l'intensité décroît (en champ libre) proportionnellement à la distance (à la différence d'un champ statique qui s'affaiblit proportionnellement au carré de celle-ci). Le calcul du rayonnement total d'une antenne (grandeur et direction) s'obtient par intégration des effets de ces petits éléments de courant qui la

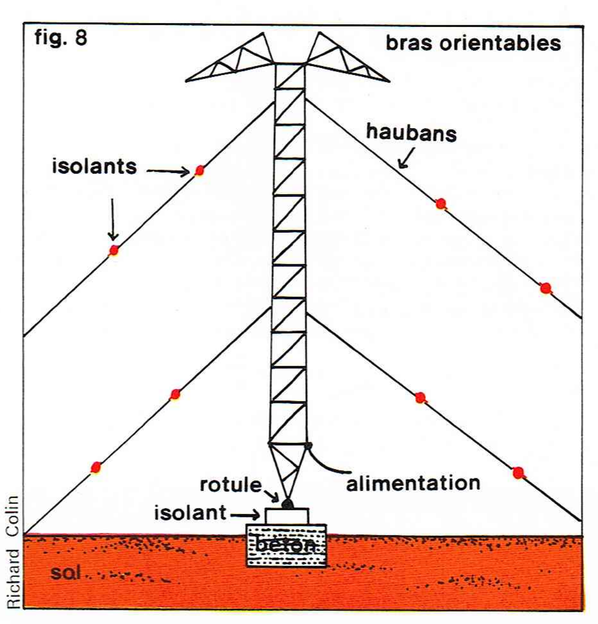
composent (dipôles électriques de Maxwell). En particulier, on comprend qu'un circuit fermé de petites dimensions devant la longueur d'onde ne rayonne pas à grande distance, à cause de la compensation entre ses différentes parties.

La résistance de rayonnement $R_0$ est donnée par l'expression : $P = R_0 I^2$, P étant la puissance moyenne rayonnée, I l'intensité dans l'élément de courant. L'impédance caractéristique ramenée au point d'excitation de l'antenne doit être adaptée au générateur qui l'alimente ; si leurs impédances caractéristiques sont différentes, une partie de l'onde est réfléchie par l'antenne, ce qui augmente inutilement les pertes. La sensibilité de ce phénomène à la fréquence est inversement liée au diamètre des conducteurs utilisés par l'antenne (possibilité d'antennes « large bande »).






Lorsque l'antenne est constituée par un simple *fil vertical*, elle ressemble à un circuit ouvert (*fig.* 6a). En fait, il s'agit bien d'un circuit fermé, la haute fréquence traversant le condensateur formé par l'espace entre le sol et le fil vertical. Pour diminuer les pertes dans le sol, il est d'ailleurs nécessaire de le rendre conducteur sur une grande distance. On choisit sa longueur un peu supérieure à la demi-longueur d'onde émise. Le courant dans l'antenne, nul au sommet et maximal à mi-hauteur, affecte la forme d'une onde stationnaire. Cette disposition permet la meilleure concentration du rayonnement dans la direction horizontale (en particulier, on évite les phénomènes de « fading » pour les ondes hectométriques en diminuant l'énergie rayonnée vers l'ionosphère) [*fig.* 7].

Cette forme d'antenne est réalisable pour les longueurs d'onde déca- et hectométriques : un fil vertical est supporté par un pylône isolé du sol. L'antenne demi-onde n'est plus possible pour les ondes kilométriques, on la remplace par une antenne quart-d'onde, ou on charge l'extrémité de l'antenne par une capacité (*fig.* 6c). Pour des raisons d'économie et afin d'élargir la bande passante de l'antenne, on utilise souvent directement le pylône comme élément rayonnant (*fig.* 8).

Édouard Berne - Fotogram

◄▲ *Figure 6 : la distribution du courant dans une antenne à fil. Pour rayonner avec une antenne plus courte une quantité d'énergie comparable à celle de l'antenne demi-onde* (a), *on charge son extrémité par un fil horizontal* (b) *qui constitue une capacité et qui ne participe pas au rayonnement (le courant moyen dans l'antenne est ainsi augmenté). En onde longue, l'antenne est chargée par une capacité élevée* (c), *et l'élément rayonnant est très court devant la longueur d'onde ; il est donc assimilable à un petit dipôle de Maxwell.*

*Figure 7 : diagramme de rayonnement d'une antenne à fil vertical, non chargée ; pour une hauteur d'antenne h égale au quart de la longueur d'onde, le diagramme a la forme d'une demi-circonférence. Pour une hauteur supérieure à la demi-longueur d'onde, un second lobe apparaît. Ce type d'antenne étant utilisé en onde moyenne, il convient d'augmenter le rayonnement horizontal et de réduire le rayonnement vers l'ionosphère (risque de fading). Le meilleur compromis est obtenu pour une hauteur un peu supérieure à la demi-longueur d'onde (h = 0,65 λ). Si l'antenne est chargée par une capacité, la hauteur la plus intéressante est égale à 0,55 λ.*

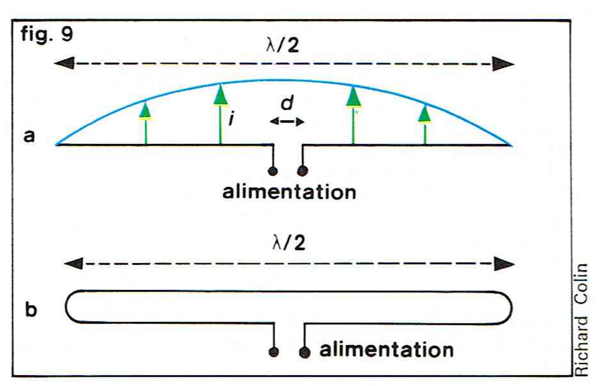
*Figure 8 : une antenne pylône ; l'adaptation de cette antenne est ajustée par l'orientation des bras terminaux (capacité variable).*

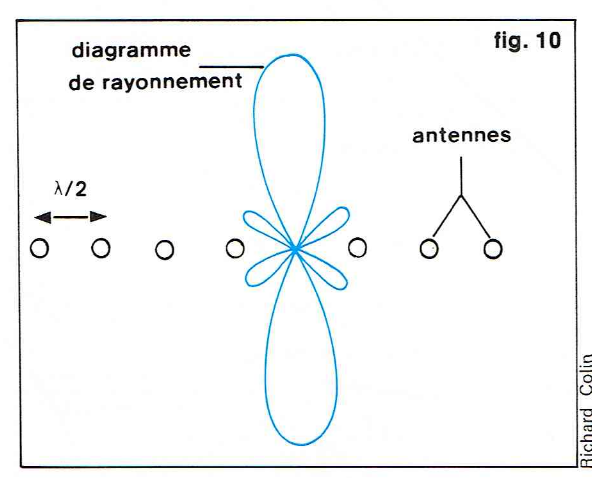
◄ *L'antenne émettrice située au sommet de la tour Eiffel (320,755 m de hauteur) assure l'émission pour les ondes de radio et de télévision.*

**▶ *Figure 9 : deux types d'antennes utilisées en ondes métriques ;*** **a, antenne dipôle ;** ***utilisée en onde courte, cette antenne est formée d'un fil de longueur égale à la demi-longueur d'onde et est coupée en son milieu pour permettre l'alimentation ; sa résistance de rayonnement est d'environ 73 Ω, et son impédance caractéristique (quelques centaines d'Ω) dépend du diamètre du conducteur et de l'écartement des fils ;*** **b, antenne trombone ;** ***variante de l'antenne dipôle, elle possède sur celle-ci l'avantage d'une résistance de rayonnement plus élevée et d'une impédance caractéristique plus faible. La largeur de bande passante est également augmentée.***

**▶ *Figure 10 :*** **l'antenne rideau.** ***Pour accroître la directivité dans une direction donnée, on fait interférer les rayonnements d'un certain nombre d'antennes ; le diagramme de rayonnement qui en résulte est fonction de leur écartement, de leur nombre et du courant dans chaque antenne. Pour réduire le rayonnement vers l'arrière (émission unidirectionnelle), on dispose derrière le premier rideau un second rideau d'antennes non alimentées.***

**▼ *Un poste de T.S.F. ancien ; on peut observer à gauche l'antenne réceptrice constituée d'un cadre muni d'un bobinage de grande surface détectant les variations de flux magnétique et à droite le haut-parleur.***




En onde métrique, le dispositif de base est l'*antenne dipôle* (*fig.* 9).

En onde courte, on recherche une grande directivité (émission longue distance pour un pays donné) et un angle de 15 à 5° par rapport à l'horizontale (utilisation de la réflexion sur l'ionosphère). On utilise l'*antenne en rideau* (rangée d'antennes verticales ou horizontales demi-onde suivant la polarisation recherchée) [*fig.* 10]. Le gain isotrope G d'une antenne directive est défini par :

$$G = 20 \text{ Log } \frac{P_i}{P_d}$$

$P_d$ étant la puissance consommée par l'antenne directive considérée et $P_i$ la puissance consommée par une antenne isotrope rayonnant dans la direction utile la même énergie que l'antenne directive.

En ondes décamétriques, les antennes sont de type « rideau de doublet à réflecteur », de gain isotrope élevé (20 dB).

En modulation de fréquence (ondes métriques), on emploie les « panneaux de doublet » ou les « panneaux à fente ». Il existe également des antennes presque indépendantes de la fréquence (« spirale » ou « périodique »).

Le coût d'installation et d'entretien d'une antenne d'émission étant très élevé, celle-ci est souvent utilisée par plusieurs émetteurs (multiplexage).

Selon la fréquence, les antennes sont alimentées par câble multifilaire (ondes kilométriques et hectométriques), par ligne symétrique (ondes décamétriques) ou par câbles coaxiaux (ondes métriques). On donne souvent le nom de « feeders » à ces liaisons et d' « aérien » à l'antenne proprement dite.




## *Réception des ondes électromagnétiques*

### Antennes de réception

Les informations transportées par le champ électrique ou par le champ magnétique d'une onde sont identiques. Pour détecter les ondes électromagnétiques, il est évidemment possible d'utiliser un système analogue au dispositif d'émission, mais ce n'est pas toujours la solution la plus pratique. Les anciens postes de radio étaient surmontés d'un cadre caractéristique constitué d'un bobinage de grande surface détectant la variation du flux magnétique. De nos jours, les postes portatifs sont munis de bâtonnets en ferrite qui ont la propriété de concentrer les lignes de champ magnétique. Leur efficacité reste limitée aux ondes kilométriques et hectométriques. Pour les ondes plus courtes, une antenne à fil (antenne télescopique) est nécessaire. La discrétion des antennes modernes de réception nous a fait progressivement oublier leur importance. La télévision, et maintenant l'excellente qualité des récepteurs en modulation de fréquence, exigent des antennes soigneusement réglées. On oublie trop souvent qu'une bonne antenne est une condition nécessaire de la réception des émissions haute fidélité, surtout en stéréophonie.

### Obstacles et parasites

Les ondes kilométriques sont très sensibles aux parasites atmosphériques mais sont rarement gênées par les obstacles naturels. En revanche, l'influence de ces derniers est prépondérante en ondes hectométriques : effet d'écran des montagnes, absorption par les structures métalliques (le champ est très irrégulier et particulièrement affaibli dans les villes), effet de cage de Faraday dans les automobiles. La sensibilité aux parasites atmosphériques est plus faible que pour les ondes kilométriques. En ondes décamétriques, les perturbations de l'ionosphère sont responsables des principales instabilités de la réception.

Les dimensions des ondes métriques les rendent peu sensibles à l'effet de cage de Faraday des structures métalliques urbaines, mais les combinaisons entre les réflexions multiples sur les obstacles provoquent souvent de mauvaises conditions locales de réception.

## *Production des oscillations haute fréquence*

Le courant haute fréquence parcourant l'antenne provient, après amplification, d'un oscillateur. Le circuit oscillant élémentaire est constitué par un condensateur et par une auto-inductance (« self ») en série. Le courant en régime permanent satisfait à l'équation :

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{1}{C}i = 0$$

dont la solution générale est :

$$i = i_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad \omega = 1/\sqrt{LC}$$

$\omega$ = pulsation ; $i_0$ et $\varphi$ sont des constantes déterminées par les conditions initiales.

Si le circuit ne comporte aucune perte, ce courant de fréquence

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

continue à osciller éternellement, à partir du moment où il a été créé : par exemple, branchement sur la « self » du condensateur préalablement chargé.

En réalité, un tel circuit perd de l'énergie par dissipation dans l'inévitable résistance des fils ou dans la résistance parasite du condensateur, et par rayonnement (rayonnement désiré par couplage au circuit d'antenne, ou perdu par rayonnement direct). Le courant s'annule donc rapidement (au bout de quelques périodes) ; l'émission en onde amortie des débuts de la T. S. F. ne permettait facilement que la transmission de signaux codés par tout ou rien. On entretient le courant en compensant continuellement les pertes d'énergie du circuit oscillant.

## *Fonctionnement d'un oscillateur électronique*

On fournit de l'énergie à l'oscillateur en insérant un amplificateur dans le circuit (oscillateur à réaction). Si $\overline{A}$ est le gain de l'amplificateur, $\overline{H}$ la fonction de transfert du circuit oscillant (notations complexes), le seul courant stable qui puisse parcourir le circuit possède une fréquence telle que

$$\overline{H}(\omega)\,\overline{A}(\omega) = 1$$

En supposant le système linéaire, la forme de ce courant est sinusoïdale : c'est la seule forme d'onde qui se conserve à la traversée d'un système linéaire.

En revanche, cette condition n'impose rien sur l'amplitude. Mais il est impossible pour un système réel de maintenir

$$\overline{H}\overline{A} = 1$$

rigoureusement. On choisit donc

$$\overline{H}'\overline{A}' = 1 + \varepsilon$$

$\overline{H}'$, $\overline{A}'$ étant les grandeurs théoriques (approximation linéaire).

Si le système est parfaitement linéaire, l'amplitude des oscillations doit croître indéfiniment ; en fait, on atteint ainsi la limite de linéarité (de l'amplificateur, par exemple), et le produit $\overline{H}\overline{A}$ diminue.

L'amplitude finale est celle pour laquelle :

$$\overline{H}\overline{A} = 1$$

$\overline{H}$, $\overline{A}$ étant les grandeurs réelles (fonctions de l'amplitude), ce qui représente maintenant une condition d'équilibre stable vis-à-vis de l'amplitude et de la fréquence. Le gain de boucle étant supérieur à 1 pour les petites amplitudes, l'amorçage de l'oscillateur est assuré par de petites fluctuations initiales (bruit thermique, etc.), qui sont ainsi rapidement amplifiées. La détermination de l'amplitude obtenue en introduisant une non-linéarité s'effectue évidemment au détriment de la perfection de la forme d'onde (distorsion des oscillateurs) : la sinusoïde idéale n'est pas réalisable par un système physique, mais on s'en rapproche suffisamment pour qu'il n'y ait pas à en tenir compte ici.

Une autre solution est possible pour entretenir les oscillations : on compense la perte d'énergie de l'oscillateur en insérant une « résistance négative » dans le circuit, de telle sorte que la résistance totale équivalente soit nulle. Cela est réalisé par certains composants électroniques convenablement polarisés (consommant donc évidemment de l'énergie).

## *Réalisation des oscillateurs*

### *L'oscillateur Colpitts*

Considérons la *figure* 11a. $R_B$ et $R'_B$ servent à polariser le transistor. C sert à isoler en continu le reste du circuit. $C_E$ se conduit comme un court-circuit pour les courants alternatifs et n'intervient pas en continu. Empêche le passage du courant alternatif (self de choc). L'alimentation (piles par exemple) se conduit également comme un court-circuit pour le courant alternatif.

Si l'on suppose la polarisation bien calculée, le transistor fonctionne normalement. Il est donc possible de réécrire le schéma de la *figure* 11a en ce qui concerne les signaux alternatifs, les seuls intéressants du point de vue de l'oscillateur proprement dit (*fig.* 11b).

$R_B$ et $R'_B$ sont en pratique beaucoup plus grands que $h$ : on peut les négliger en première approximation.

Le circuit L et $C_1$, $C_2$ en série résonne à la fréquence $f_0$ :

$$2\pi f_0 = \omega_0 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{LC_1C_2}}$$

Le schéma de principe est donc celui de la *figure* 11c.

La fonction de transfert de l'amplificateur de courant est :

$$\overline{A} = -\beta$$

La fonction de transfert du réseau de réaction est :

$$\overline{H}(\omega) = \frac{1}{(LC_2\omega^2 - 1) + j\omega h\,(LC_1C_2\omega^2 - C_1 - C_2)}$$

La condition d'oscillation est

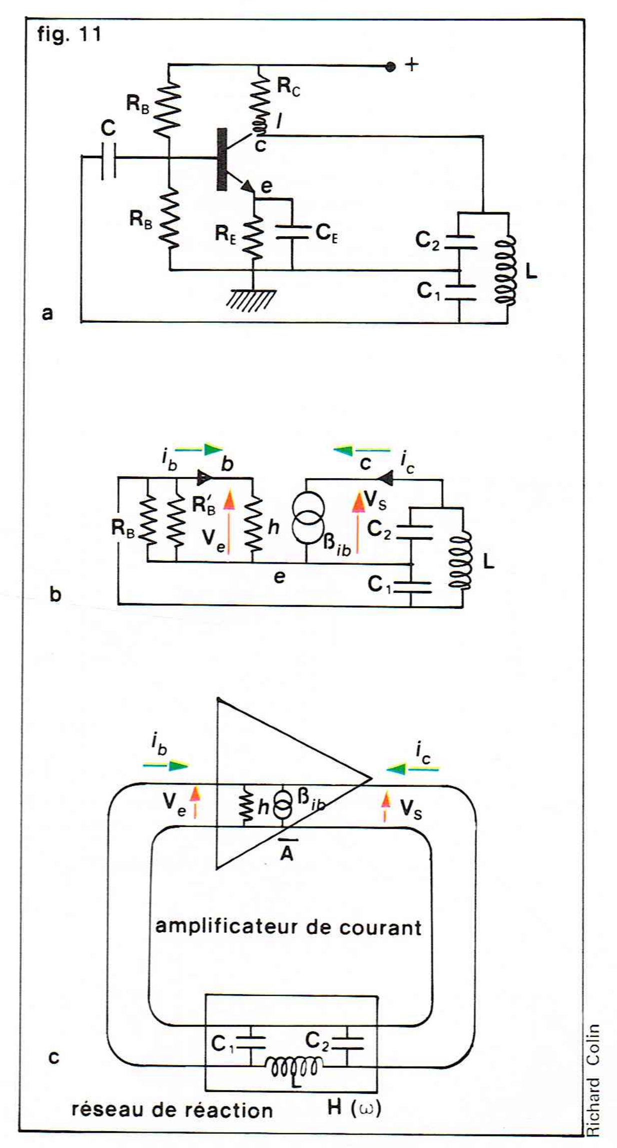
$$\overline{A}\cdot\overline{H}(\omega) = 1$$

soit :

- Argument $\overline{A}\overline{H}(\omega) = 0$, d'où

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}} = 2\pi f_0$$

$f_0$ est la fréquence d'oscillation.




◀ ***Figure 11 :*** ***l'oscillateur Colpitts ;*** *a, schéma de principe ; b, schéma équivalent (pour les petits signaux alternatifs, C, $C_E$ et l'alimentation sont des courts-circuits, tandis que l est une résistance infinie) ; c, principe de fonctionnement de l'oscillateur Colpitts.*

▼ *Figure 12 : principe de la modulation d'amplitude ; l'enveloppe du signal haute fréquence est modulée au rythme de la basse fréquence.*

*Figure 13 : spectre de fréquence en modulation d'amplitude ; si le signal de fréquence $f_0$ est modulé par un signal de fréquence f, son spectre comprend les fréquences $f_0$, $f_0 + f$ et $f_0 - f$. Pour un signal complexe comportant des fréquences comprises entre $f_{max}$ et $f_{min}$, le spectre de l'onde modulée occupe la fréquence porteuse $f_0$ et les deux bandes latérales de la figure.*

*Figure 14 : a, signal de modulation à l'entrée du modulateur en anneau ; b, signal de sortie du modulateur : en l'absence de modulation, le signal est nul, c'est une modulation sans porteuse.*

• Module $\overline{AH}$ (ω) = 1, d'où $-\beta = \frac{C_2}{C_1}$.

L'amplitude est fixée par la non-linéarité du gain en courant (β) du transistor.

On améliore la stabilité de l'oscillateur Colpitts en ajoutant une capacité en série avec L.

*L'oscillateur Hartley* ressemble au montage Colpitts (2 bobinages au lieu de L et une seule capacité au lieu de $C_1$ et $C_2$).

*L'oscillateur à quartz* se caractérise par sa grande stabilité de fréquence. Il utilise les propriétés électromécaniques d'un cristal de quartz piézo-électrique. On le rencontre très souvent dans les montages fonctionnant en ondes courtes.

*L'oscillateur à déphasage* comporte un réseau de réaction à base de résistances et de condensateurs. Il est utilisé en basse fréquence.

*L'oscillateur à pont de Wien :* il est généralement employé dans les oscillateurs à fréquence variable. La fonction de transfert du réseau de réaction est réglable par variations de capacités et de résistances.

## Modulation de l'onde porteuse

On choisit de moduler une des caractéristiques de l'onde porteuse par le signal basse fréquence en provenance du microphone. Ce signal est proportionnel à la vibration sonore : sa fréquence est comprise entre 20 et 20 000 hertz. Dans le dessein de simplifier la technologie, on diminue parfois cet intervalle de fréquence (réduction de la bande passante), et on modifie le rapport des variations d'amplitude (compressions de dynamique).

En l'absence de toute modulation, le signal porteur haute fréquence s'écrit :

$$s = S \sin(\omega t + \varphi)$$

S étant l'amplitude, $\frac{\omega}{2\pi}$ la fréquence, φ la phase.

Ces trois grandeurs S, ω, et φ peuvent être modulées à la fréquence du signal basse fréquence, la réception du signal basse fréquence étant réalisée en détectant cette modulation.

### Modulation d'amplitude

Si $s_m(t)$ est le signal basse fréquence à transmettre, on réalise une modulation d'amplitude de la porteuse (*fig.* 12) si

$$S = S_0 (1 + a s_m(t))$$

alors $$s = S_0 (1 + a s_m(t)) \sin(\omega t + \varphi)$$

On montre, par décomposition en série de Fourier, que le signal $s_m(t)$ peut être considéré comme la superposition de signaux sinusoïdaux dont la fréquence appartient à la bande passante occupée par $s_m(t)$. Si $f_{min}$ est la borne inférieure de la bande passante et $f_{max}$ la borne supérieure, le spectre de fréquence de l'onde porteuse modulée prend l'allure symétrique de la *figure* 13. On choisit *a* tel que

$$1 + a s_m(t)$$

reste toujours positif. Si S (t) est purement sinusoïdal, d'amplitude $s_0$, le produit $a s_0 = m$ est appelé taux de modulation. Lorsque $m > 1$, il y a surmodulation.

L'émetteur rayonne de l'énergie même en l'absence de modulation ($a = 0$) : il est possible d'augmenter le rendement énergétique d'une émission en supprimant la porteuse pure et une bande latérale : c'est l'émission en bande latérale unique (BLU). On réalise pour chaque composante de Fourier du signal basse fréquence, un signal modulé d'expression :

$$s = \frac{S_0 a s_0}{2} \cos[(\omega_0 + \omega) t + \varphi]$$

$\omega_0$ = fréquence porteuse
ω = fréquence de la composante de Fourier considérée au lieu de

$$s = S_0 (1 + a s_0 \sin \omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi)$$
$$= S_0 + \frac{S_0 a s_0}{2} \cos[(\omega - \omega_0) t + \varphi]$$
$$- \frac{S_0 a s_0}{2} \cos[(\omega + \omega_0) t + \varphi]$$

La détection est plus difficile que dans le cas de la modulation d'amplitude classique, et la complexité du récepteur en BLU limite l'intérêt du système.

Pour diminuer le niveau du « bruit de fond », il est nécessaire de réduire la bande passante du signal détecté, et donc celle du signal basse fréquence. D'autre part, le taux de modulation admissible impose une importante compression de dynamique. Typiquement, on observe :

— bande transmise 50 à 4 500 Hz (bande des fréquences audibles : 20 à 20 000 Hz) ;

— dynamique permise 40 dB (dynamique réelle moyenne : 90 dB).

La « musicalité » d'un poste récepteur en modulation d'amplitude est donc limitée par son principe et non par sa qualité.

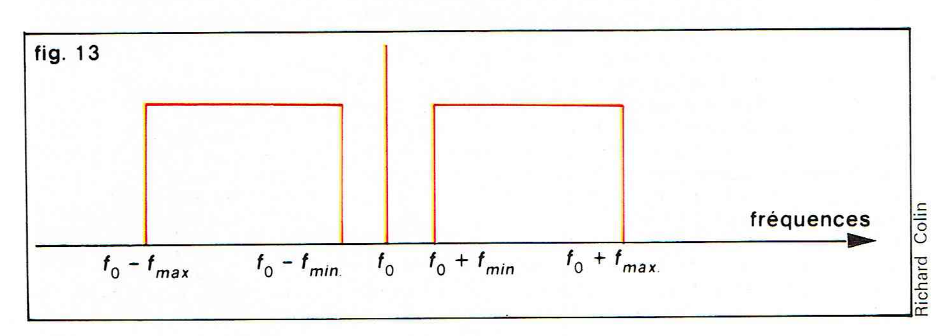
#### Technique de modulation et de démodulation d'amplitude

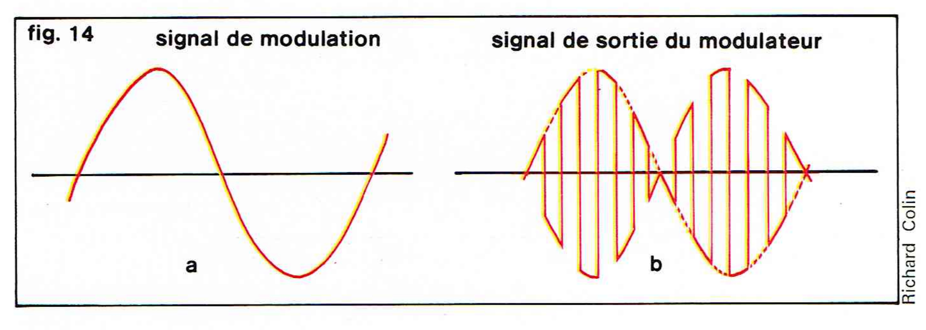
**Modulation avec porteuse :** le gain de l'amplificateur haute fréquence est commandé par le signal basse fréquence.

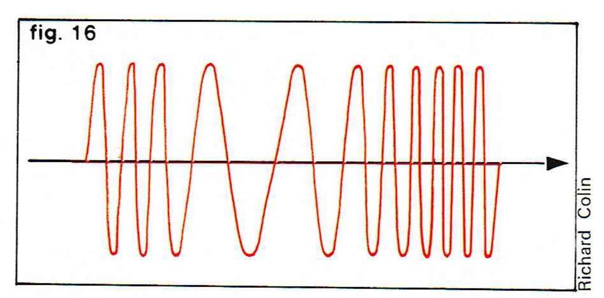
**Modulation sans porteuse :** on utilise un modulateur en anneau : c'est un interrupteur électronique qui inverse le courant basse fréquence au rythme de la haute fréquence (*fig.* 14).

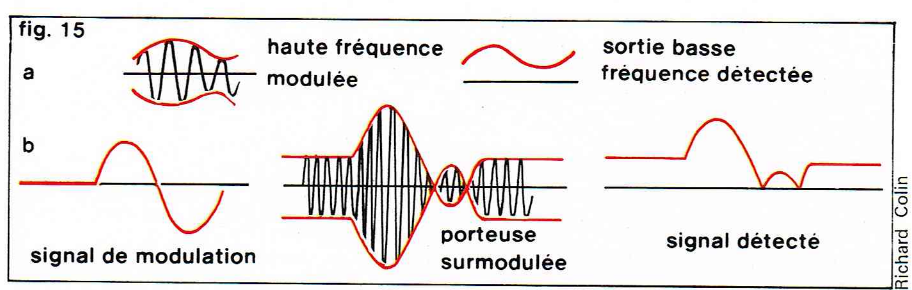
**Démodulation avec porteuse :** la détection s'effectue simplement en redressant l'onde porteuse modulée

fig. 12
silence
son grave
son aigu
surmodulation
Richard Colin






▲ *Figure 15 :* a, démodulation d'amplitude; b, surmodulation : *lorsque le taux de modulation est supérieur à 1, l'enveloppe détectée n'est plus identique au signal initial.* *Figure 16 :* allure d'une onde modulée en fréquence; *sur cette figure, les variations de fréquence sont exagérées par rapport à la fréquence porteuse.*

et en filtrant la haute fréquence (circuit à diode et condensateur) [*fig.* 15].

**Démodulation sans porteuse :** elle est réalisable par l'opération inverse de la modulation.

## Modulation de fréquence

*Principe.* La fréquence instantanée $F_i$ du signal porteur varie au rythme du signal à transmettre. Supposons ce dernier sinusoïdal de fréquence $f$ :

$$F_i = F_0 + F \cos (2 \pi f t)$$

($F_0$ = fréquence porteuse en l'absence de modulation). $\Delta F$ représente l'excursion maximale de fréquence (« déviation » maximale). Le rapport $\frac{\Delta F}{f} = k$ est appelé « indice de modulation » (*fig.* 16).

### Spectre de fréquences

Par définition, la fréquence instantanée $F_i$ du signal porteur est la dérivée par rapport au temps de son argument :

$$S = S_0 \cos [F(t)]$$

$$F_i = \frac{dF(t)}{dt}$$

et donc

$$S = S_0 \cos (\omega_0 t + k \sin \omega t)$$

S étant le signal modulé avec

$$\omega_0 = 2 \pi F_0$$

$$\omega = 2 \pi f$$

S se décompose en série de Fourier (somme de signaux sinusoïdaux)

$$S/S_0 = J_0(k) \cos \omega_0 t$$
$$+ J_1(k) [\cos (\omega_0 + \omega) t - \cos (\omega_0 - \omega) t]$$
$$+ \ldots$$
$$+ J_n(k) [\cos (\omega_0 + n\omega) t - \cos (\omega_0 - n\omega) t]$$
$$+ \ldots$$

$J_n(k)$ étant la fonction de Bessel d'ordre $n$.

On constate donc que le spectre de fréquence s'étend à l'infini de part et d'autre de la fréquence porteuse $F_0$. L'examen des fonctions de Bessel montre heureusement que l'amplitude des raies latérales décroît constamment à partir d'un certain rang, lié évidemment à l'indice de modulation (*fig.* 17).

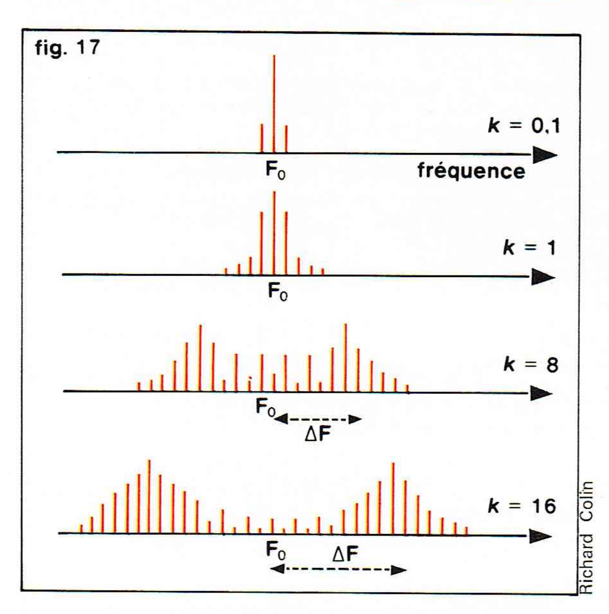
Lorsque $k$ est très grand, la largeur du spectre ne dépend pratiquement plus de la fréquence, mais seulement de $\Delta F$ : cela limite la bande pratique occupée dans le cas des basses fréquences (pour lesquelles elle est théoriquement infinie).

Pour les indices de modulation très faibles, la largeur du spectre est la même qu'en modulation d'amplitude et vaut $2f$. On admettra donc en modulation de fréquence une largeur de spectre de

$$2(f + kf) = 2(f + \Delta f)$$

L'encombrement du spectre étant beaucoup plus grand qu'en modulation d'amplitude, la fréquence porteuse doit être élevée (supérieure à 50 MHz en général), pour maintenir le rapport bande de fréquence sur fréquence porteuse à une valeur raisonnable.

L'intérêt de ce type de modulation est sa relative insensibilité aux parasites perturbant l'amplitude de l'onde qui sont de loin les plus nombreux (parasites atmosphériques et industriels). Tout se passe comme si




◄ *Figure 17 : spectre d'une onde modulée en fréquence pour différentes valeurs de l'indice de modulation k.*

la modulation de fréquence avantageait le signal le plus intense. Le niveau du bruit parasite ayant été abaissé, il est donc possible d'augmenter la bande passante d'émission, et la qualité du son reconstitué entre 50 et 15 000 Hz avec 80 dB de dynamique, contre 50 Hz à 4 500 Hz et 40 dB en modulation d'amplitude, rejoint les normes haute fidélité.

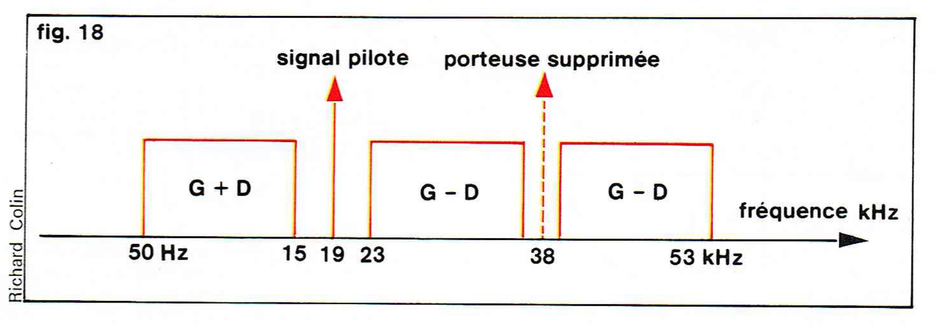
La modulation de fréquence est réservée aux transmissions directes à faible distance (200 km) : on utilise des réémetteurs pour couvrir l'ensemble du territoire.

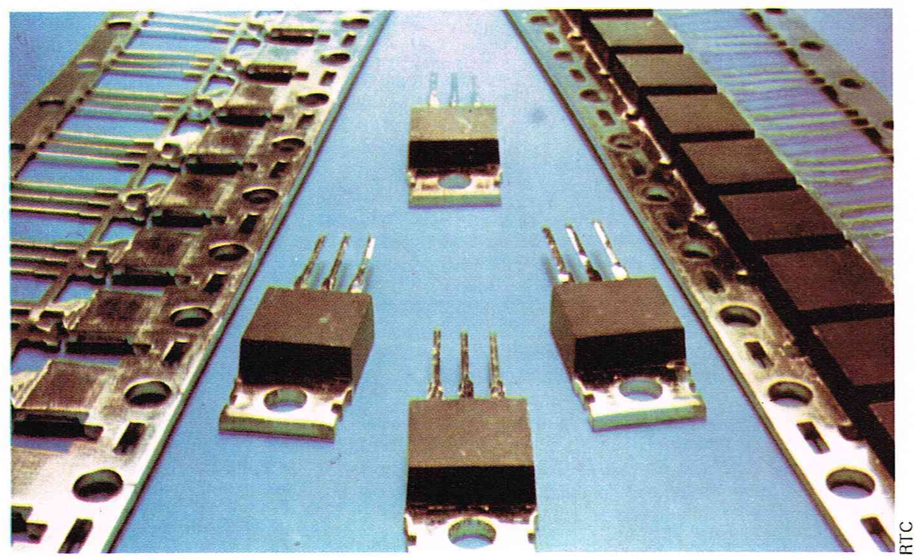
### La stéréophonie en modulation de fréquence

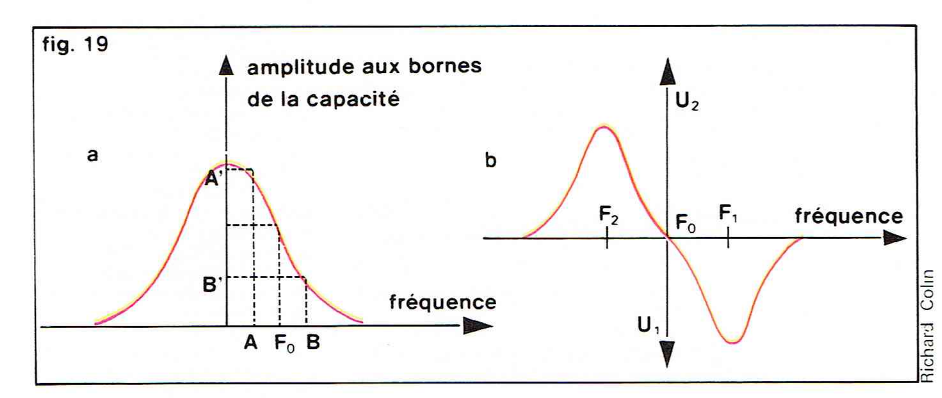
*Principe :* il s'agit de transmettre séparément les signaux gauche (G) et droit (D) nécessaires à la reproduction stéréophonique. De plus, il est commode que le système soit « compatible », c'est-à-dire qu'un récepteur ordinaire non prévu pour l'effet stéréophonique puisse recevoir le signal monophonique (G + D). On module en amplitude une sous-porteuse à 38 kHz par le signal G — D : on obtient la sous-porteuse, et les deux bandes latérales 23 à 38 kHz et 38 à 53 kHz. Ce signal est ajouté au signal G + D et l'ensemble (signal « multiplex ») sert à moduler en fréquence l'émetteur proprement dit (les fréquences porteuses MF en France varient entre 88 et 100 MHz).

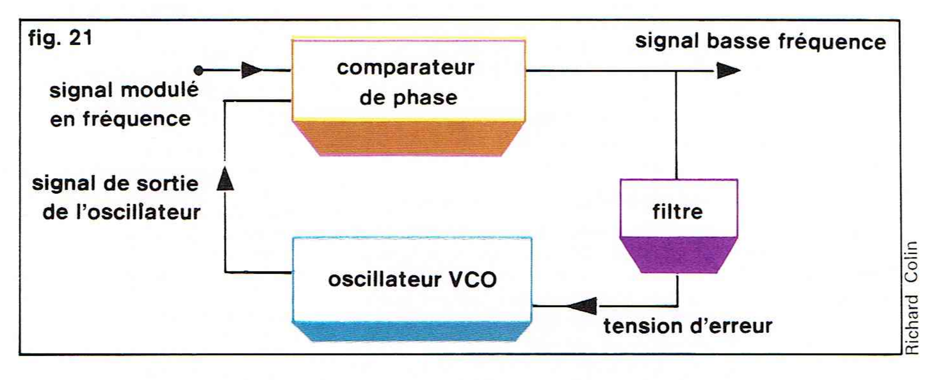
On améliore encore ce procédé en supprimant la sous-porteuse à 38 kHz dont la grande intensité est une source d'élargissement des spectres de sortie (intermodulation) [*fig.* 18]. La démodulation de G — D est

▼ *Figure 18 : spectre du signal « multiplex » ; ce signal basse fréquence comporte, outre la bande habituelle* (G + D), *le signal* (G — D) *codé sous la forme d'une modulation d'amplitude à porteuse supprimée.*






▲ *En haut, fabrication de transistors de puissance utilisés dans les amplificateurs.*

*Figure 21 : une boucle d'asservissement de phase.*

▼ *Figure 22 : schéma synoptique d'un récepteur stéréophonique en modulation de fréquence.*

rendue possible en reconstituant cette sous-porteuse à partir d'un signal pilote de fréquence moitié (19 kHz), généré par l'émetteur, qui se situe donc au milieu de l'intervalle compris entre le signal G + D et la bande inférieure de G — D.

A la réception, on peut séparer par filtrage à la sortie du démodulateur de fréquence (discriminateur) :

— le signal G + D compris entre 50 et 15 kHz : signal monophonique seul conservé par le récepteur ordinaire ;

— le signal à 19 kHz, dont on double ensuite la fréquence (on reconstitue la sous-porteuse à 38 kHz) ;

— les deux bandes latérales comprises entre 23 et 53 kHz du signal G — D. On ajoute à ces deux bandes le signal à 38 kHz, et on démodule en amplitude pour obtenir G — D. G + D et G — D sont ajoutés et retranchés, et les deux canaux G et D sont ainsi reconstitués.

Mais le décodeur stéréophonique le plus utilisé met à profit la remarque suivante : le signal « multiplex » à la sortie du discriminateur est la superposition de deux signaux : le signal BF (G + D) d'une part, et le signal (G — D) d'autre part en modulation sans porteuse.

Nous avons vu qu'un signal en modulation sans porteuse peut être considéré comme le signal lui-même alternativement inversé au rythme de la fréquence porteuse. Le signal « multiplex » est donc, dans une alternance de la haute fréquence, la somme

$$(G + D) + (G - D) = 2\,G$$

et, dans l'alternance suivante :

$$(G + D) - (G - D) = 2\,D$$

Pour décoder ce signal, il suffit de le découper à la fréquence sous-porteuse (38 kHz) et d'aiguiller les tranches consécutives sur deux sorties différentes qui forment les voies droite et gauche. Cette opération est obtenue avec un circuit du type démodulateur en anneau déjà rencontré.

### *Circuits de modulation en* MF

La modulation de la fréquence porteuse est obtenue en agissant sur l'accord de l'oscillateur, l'ajustement de l'amplitude de la déviation de fréquence étant réalisé par un changeur ou un multiplieur de fréquence. On trouve en pratique :

— modulation par inductance variable : une bobine à noyau de ferrite a son coefficient de self-induction dépendant du courant de polarisation qui sert à le moduler ;

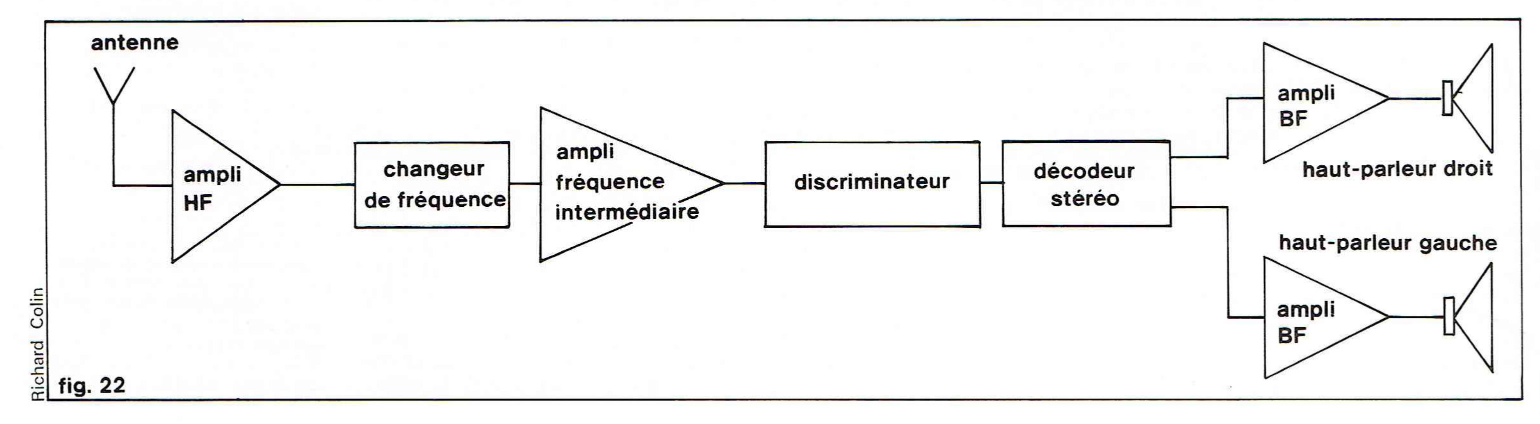
— modulation par capacité variable : la diode « Varicap » (marque déposée d'un semi-conducteur à jonction) forme une capacité dépendante de sa tension inverse ;

— modulation par réactance variable avec le point de fonctionnement du transistor de l'oscillateur. On introduit ainsi toujours un peu de modulation d'amplitude parasite, dont on peut se débarrasser par écrétage.

L'écrétage revient à remplacer la sinusoïde de la porteuse par une fonction en créneaux de même fréquence, c'est-à-dire qu'on rajoute au spectre de fréquences un certain nombre d'harmoniques qui sont éliminés par filtrage à l'émission ou à la réception.

### *Circuits de démodulation* MF

Ils sont plus complexes que le simple redressement et filtrage de la démodulation d'amplitude, ce qui explique



le prix plus élevé des récepteurs MF. On peut transformer la modulation de fréquence en modulation d'amplitude en envoyant le signal modulé en fréquence sur un circuit oscillant accordé sur une fréquence voisine : le signal aux bornes de la capacité a une amplitude à peu près proportionnelle à la fréquence du signal MF (*fig.* 19a).

On réalise des discriminateurs plus linéaires en rendant symétrique le montage précédent (*fig.* 19b).

Comme ce système manque de fiabilité, on lui préfère le discriminateur du type « Foster Seeley », ou à comptage d'impulsions (*fig.* 20).

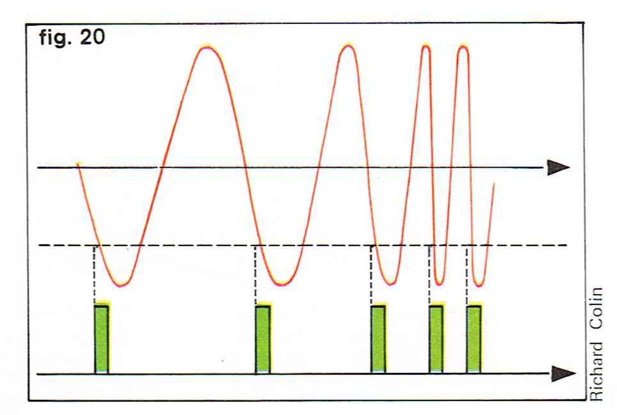
Détection par boucle d'asservissement de phase (circuits PLL, abréviation de l'anglais « phase locked loop ») : le signal modulé en fréquence et un signal de référence produit par un oscillateur dont la fréquence est contrôlée par une tension (VCO, de l'anglais « Volt controled oscillator ») sont envoyés sur un comparateur de phase ; si la fréquence du VCO est constamment identique à la fréquence porteuse, le comparateur de phase donne directement le signal basse fréquence démodulé. Pour assurer cette identité, le signal du comparateur de phase, convenablement filtré, sert de tension d'erreur pour le VCO, dont la fréquence est ainsi asservie à celle de la porteuse (*fig.* 21). Bien que ce système paraisse très simple, il cumule les difficultés de l'oscillation et de l'asservissement haute fréquence ; la mise au point en est difficile. Les circuits PLL sont actuellement disponibles en circuits intégrés et équipent un grand nombre de discriminateurs récents.

### *Conception actuelle des récepteurs*

Que ce soit en modulation d'amplitude ou en modulation de fréquence, le signal modulé haute fréquence de l'antenne est amplifié, puis sa fréquence est abaissée par battement avec un oscillateur local dont la fréquence est réglée par la commande de sélection des stations. On dispose ainsi d'un signal de fréquence intermédiaire (FI) [455 kHz en modulation d'amplitude, 10,7 MHz en modulation de fréquence], dont les caractéristiques répondent mieux aux nécessités de la détection ; en particulier, la fréquence est fixe quel que soit l'émetteur reçu (*fig.* 22).

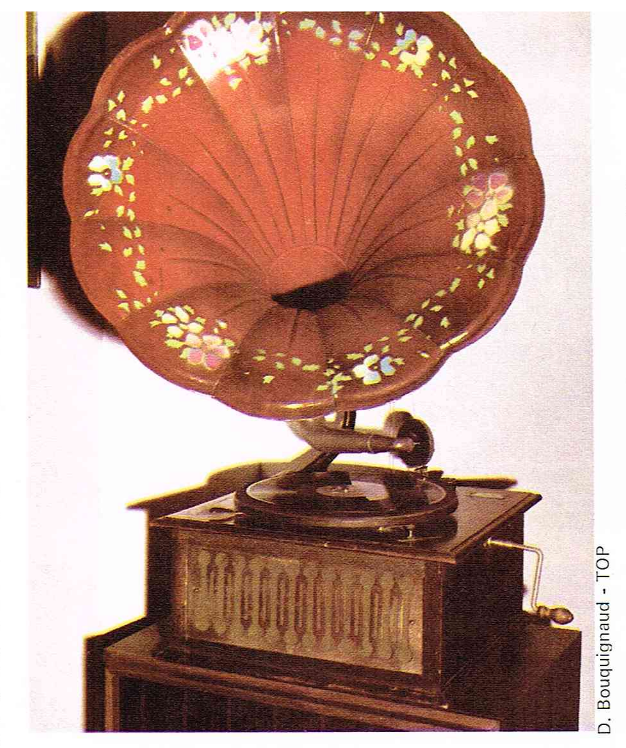
Les semi-conducteurs ont progressivement remplacé les tubes à vide chaque fois qu'une forte puissance et une haute fréquence n'étaient pas simultanément nécessaires (le dernier étage des émetteurs utilise toujours une « lampe » particulière refroidie par vaporisation d'eau : le « Vapotron »). Le circuit intégré (concentration sur une plaquette de quelques mm$^2$ d'un très grand nombre de composants électroniques) apporte sur les montages « discrets » une simplification de câblage et un gain de place important, mais ne constitue pas toujours une économie. Il est très employé en modulation de fréquence, et on peut même réaliser des amplificateurs haute fidélité entièrement à l'aide de composants de ce type, jusqu'à une puissance de sortie d'une vingtaine de watts. Depuis l'apparition des diodes à capacité variable en fonction de leur tension inverse (« Varicap »), on peut remplacer, dans les récepteurs MF, le classique condensateur d'accord par un simple potentiomètre.

Les schémas électroniques comportent peu de nouveautés, mais s'améliorent par l'utilisation de techniques professionnelles classiques que le circuit intégré met à la portée des appareils grand public.



Richard Colin

◀ **Figure 20 : principe du comptage d'impulsions.** *On déclenche une impulsion de largeur donnée lorsque le signal d'entrée passe par un niveau donné ; le nombre d'impulsions par unité de temps est proportionnel à la fréquence du signal (cette opération est facilement réalisable à l'aide de circuits intégrés). Le signal basse fréquence est obtenu par intégration des impulsions, avec une constante de temps un peu inférieure à la période la plus courte de la modulation.*


D. Bouquignaud - TOP

◀ *Un phonographe ancien à disques.*

◀ *Page ci-contre, au milieu, figure 19 :* **a, démodulation de fréquence.** *Pour de petites variations de fréquence autour de* $F_0$*, l'amplitude de la tension haute fréquence aux bornes de la capacité varie à peu près proportionnellement à l'écart de fréquence ;* **b, démodulation symétrique ;** *la tension* $U_1$ *est proportionnelle à l'écart de fréquence lorsque celle-ci est comprise en* $F_0$ *et* $F_1$*. De même* $U_2$ *est proportionnelle à cet écart lorsque la fréquence est comprise entre* $F_0$ *et* $F_2$*;* $U_1$ *et* $U_2$ *sont, comme dans le cas d'un circuit résonnant unique, des signaux haute fréquence modulés en amplitude. On recueille après détection la différence de leurs enveloppes. Le détecteur étant également sensible aux variations d'amplitudes du signal haute fréquence, il est nécessaire d'écrêter ce dernier avant de le démoduler.*

# PROCÉDÉS D'ENREGISTREMENT ET DE REPRODUCTION DES SONS

L'information sonore est de nos jours presque toujours traduite en un signal électrique. L'enregistrement est la mise en mémoire de ce signal ; la reproduction est la lecture de cette mémoire qui restitue le signal électrique. L'électronique et l'électrotechnique sont à la base de tous les procédés modernes, mais c'est à la mécanique du « phonographe » que nous devons la première réalisation connue. Rappelons les principales étapes de cette découverte :

L. E. Scott de Martinville décrivait, dans un brevet français de 1859, un appareil permettant de « dessiner » les sons : le phonotaugraphe transformait les vibrations d'une membrane sensible à la pression acoustique en un tracé sur rouleau enduit de noir de fumée ; il devait servir à l'étude de la voix humaine et des instruments de musique. Seize ans plus tard, Charles Cros imagine un procédé permettant non seulement d'enregistrer mais de reproduire les sons : par photogravure à partir des tracés du phonotaugraphe, un sillon est gravé en relief ou en creux, et entraîne une aiguille solidaire d'une membrane qui reproduit le son initial. Mais c'est l'Américain T. Edison qui présente l'année suivante le premier appareil porté à la connaissance du public : son « phonographe » utilise l'essentiel des principes énoncés par Charles Cros, avec une amélioration pratique : l'enregistrement hélicoïdal sur le cylindre et le choix du milieu d'enregistrement (feuille d'étain, puis cire).

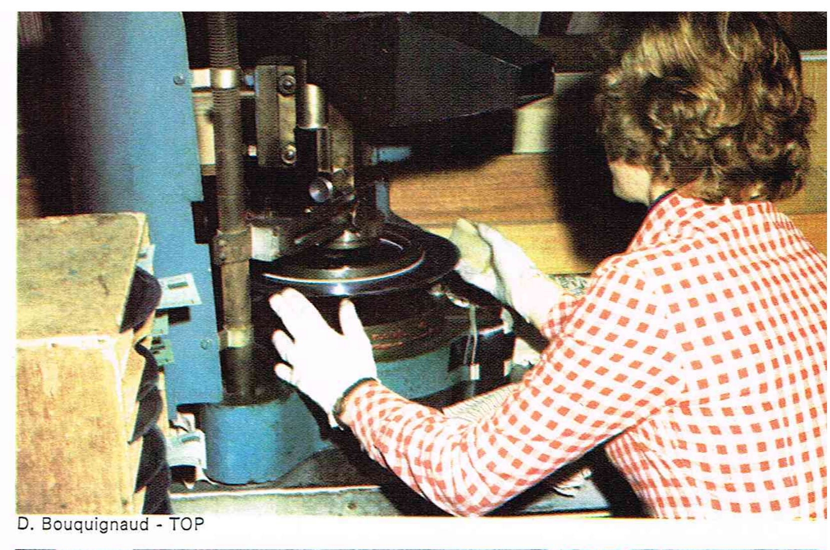
Cette même année, Charles Cros décrit un grand nombre de procédés d'enregistrement des sons (dont la gravure latérale, principe de nos disques modernes), ainsi que le premier procédé électro-acoustique (une substance chimique est plus ou moins décomposée par le courant modulé d'un « microphone » et sert ensuite de résistance dans le circuit d'un écouteur lors de la reproduction).

Berliner construit en 1887 le « gramophone » : l'enregistrement est effectué sur disque plat en gravure latérale et la duplication est obtenue par pressage. Les premiers électrophones (« pick up ») datent de 1925 et marquent le début de l'ère électro-acoustique. Les enregistrements sur disque et optique résistent à la concurrence du magnétophone (1945) par leur grande facilité de duplication mais sont progressivement remplacés par ce dernier dans de nombreux domaines. La qualité de l'enregistrement sur disque est améliorée (microsillons) et en 1958 apparaît la gravure stéréophonique.

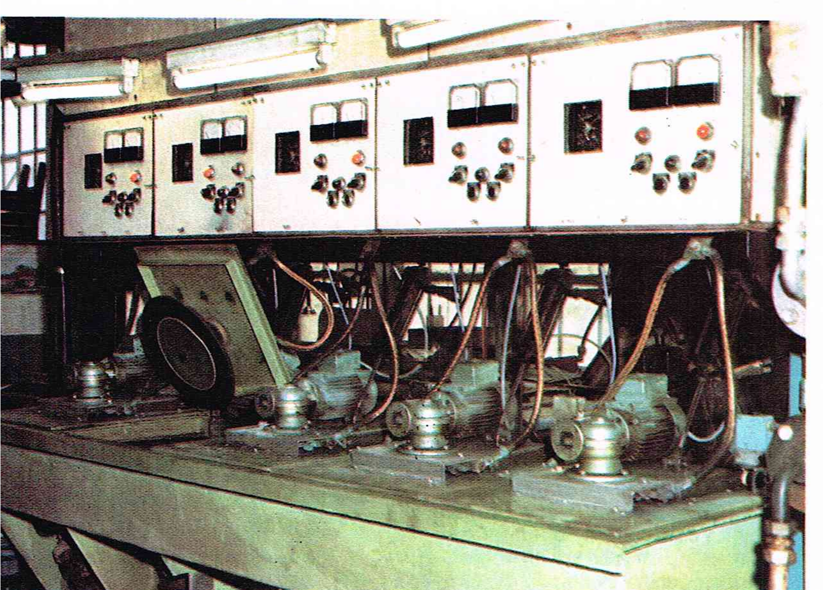
Actuellement les recherches dans le domaine de l'enregistrement sont axées sur la production des hautes fréquences (magnétoscope et vidéodisque pour la télévi-



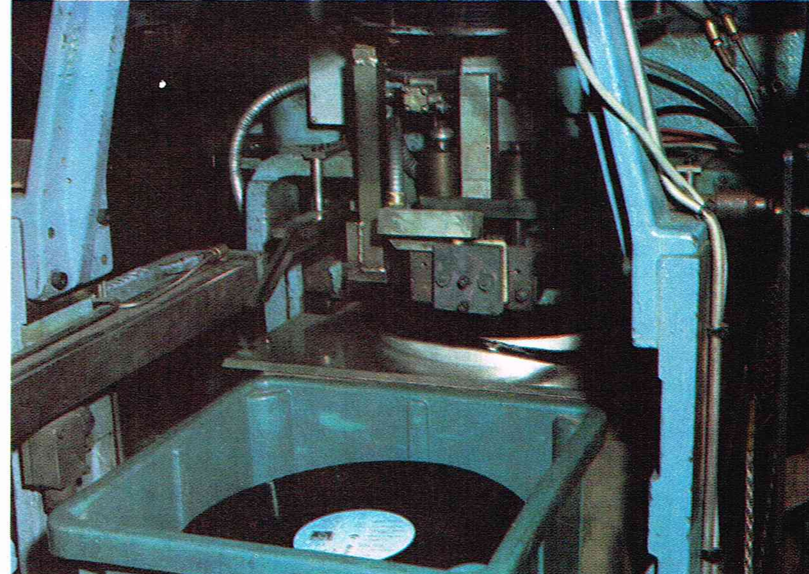
D. Bouquignaud - TOP



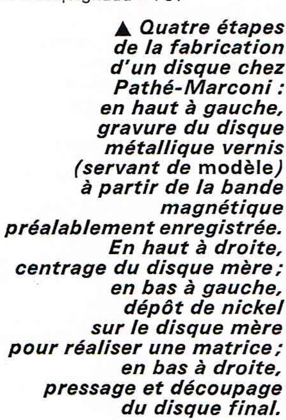
D. Bouquignaud - TOP



D. Bouquignaud - TOP



D. Bouquignaud - TOP



***▲ Quatre étapes de la fabrication d'un disque chez Pathé-Marconi : en haut à gauche, gravure du disque métallique vernis (servant de modèle) à partir de la bande magnétique préalablement enregistrée. En haut à droite, centrage du disque mère ; en bas à gauche, dépôt de nickel sur le disque mère pour réaliser une matrice ; en bas à droite, pressage et découpage du disque final.***

sion), et sur les supports nouveaux (mémoires électrostatiques).

Bien qu'ayant souvent été envisagés les dispositifs d'enregistrement sans mouvement mécanique n'ont à ce jour pas reçu d'application.

## *Généralités*

### *Points communs*

La principale caractéristique d'un procédé d'enregistrement et de reproduction des sons est la nécessité d'une mémoire, qui est le support matériel de l'information. Généralement, cette mémoire est une « piste » continue et, à chaque élément de longueur de cette piste, correspond un instant du signal enregistré ; l'amplitude du signal est représentée par la modification locale d'une caractéristique du support (aimantation, épaisseur, transparence, etc.). Pour des raisons d'encombrement, la piste peut revêtir différentes formes : piste en spirale à la surface d'un disque, linéaire sur une bande de magnétophone, en segments parallèles sur la bande d'un magnétoscope, etc.

Les transducteurs électro-acoustiques permettent de ramener le problème d'enregistrement et de reproduction des sons à celui du traitement des signaux électriques.

On distingue deux méthodes de traitement du signal à enregistrer.

#### Méthode analogique

Le phénomène sonore est linéairement relié au signal électrique. Si l'organe de lecture se déplace par rapport à la piste à la même vitesse que l'organe d'enregistrement, le signal initial sera correctement restitué en amplitude et en phase. La simplicité du système désigne tout de suite ses points faibles : nécessité d'une vitesse constante et d'une linéarité parfaite. En pratique, cette linéarité n'est jamais réalisée : on la remplace par une loi connue plus facile à respecter ou améliorant les performances. La vitesse peut être constante (bande magnétique), ou variable s'il est facile d'obtenir la même loi de variation à l'enregistrement et à la lecture (piste de disque).

#### Méthode numérique

Dans le dessein d'étendre à partir d'un support donné les possibilités de linéarité et d'immunité au bruit, il est possible de quantifier le signal après échantillonnage ; cette quantification est alors enregistrée sous forme numérique (tops binaires) ou analogique (longueur d'impulsion, etc.). Une porteuse modulée en fréquence est un exemple approché de quantification analogique. Cet artifice a l'avantage de permettre l'enregistrement des très basses fréquences, en translatant le spectre de l'information vers de plus hautes fréquences. Cette technique commence à faire quelques apparitions sur le marché de la haute fidélité.

### *Performances*

#### Limitation mécanique

Dans tous les cas, il y a mouvement relatif des organes d'enregistrement ou de lecture et de la piste. En général, seule la piste se déplace (disque, bande du magnétophone) ; parfois, cependant, tous sont mobiles (magnétoscope). La précision de ces mouvements est un élément important de la qualité de l'appareil ; les moteurs sont souvent équipés d'un asservissement électronique. Les erreurs de vitesse peuvent être des variations rapides (effet de scintillement), la durée moyenne du message sonore restant correcte, ou lentes (effet de pleurage) ; la fréquence du son est alors modifiée proportionnellement au rapport des vitesses d'enregistrement et de lecture.

#### Résolution

La longueur d'onde de la modification de la caractéristique du support ne peut pas être réduite indéfiniment (elle est limitée par le grain de l'émulsion photographique en son optique, l'étendue des domaines magné-

tiques sur une bande de magnétophone, la largeur du sillon d'un disque). Il existe donc une limite supérieure aux fréquences enregistrables. On peut évidemment reculer cette limite en augmentant la vitesse de défilement de la piste, au prix de difficultés mécaniques qui, souvent, sont rapidement prohibitives. La fréquence supérieure limitant la bande passante est ainsi le résultat d'un compromis entre la résolution du support et la vitesse de défilement. La limitation inférieure de la bande passante est due au principe des transducteurs de lecture, qui sont en général incapables de fonctionner en dessous d'une certaine fréquence.

A ces problèmes s'ajoute souvent celui de la dépendance en fréquence du rendement de ces organes.

**Distorsion d'amplitude**

La réponse du milieu d'enregistrement possède une limite de linéarité, qu'il convient de ne pas dépasser. On fixe par conséquent un niveau maximal de modulation. Mais une part importante du bruit (bruit blanc dû à la structure du support) étant indépendante du niveau de modulation, il est intéressant d'être aussi près que possible de cette limite. Ce nouveau compromis est obtenu par la « compression de dynamique » : on empêche le niveau de modulation d'aller au-delà du seuil de linéarité; les pointes de modulation sont « comprimées », mais la forme générale de l'onde n'est pas altérée et le message reste intelligible. De même, on peut relever les sons très faibles pour éviter qu'ils ne soient noyés dans le bruit. Parfois, à la lecture, un système électronique corrige automatiquement cette distorsion volontaire : on effectue alors une amélioration du rapport signal sur bruit. Comme les propriétés de linéarité dépendent de la fréquence, la modification de la dynamique doit être également fonction de celle-ci. On comprend ainsi la nécessité des normes qui garantissent la compatibilité d'appareils de diverses fabrications.

## *Principaux procédés*

On utilise actuellement l'enregistrement mécanique (disque), magnétique (magnétophone), et plus rarement optique (cinéma sonore). Citons de plus les procédés électrostatiques, qui suscitent un intérêt croissant depuis l'apparition des électrets.

### *Enregistrement par gravure sur disque*

On ne réalise pratiquement plus d'enregistrements monophoniques, mais le principe de la gravure latérale est facilement compréhensible à partir de celui-ci et la méthode d'enregistrement stéréophonique s'en déduit aisément : le son est enregistré sur magnétophone, et la gravure effectuée plus tard après divers montages et contrôles. Un disque métallique verni tourne avec une vitesse constante. Un burin graveur découpe dans le vernis un sillon de profondeur constante dont la section a la forme d'un V (*fig.* 1). En l'absence de modulation, le burin est entraîné avec une vitesse régulière de l'extérieur vers l'intérieur du disque par une vis hélicoïdale, de telle sorte que le sillon découpé est une spirale couvrant toute la surface du disque. Cette spirale constitue l'axe de la piste d'enregistrement. Lorsqu'on applique le signal de modulation, le burin se déplace au rythme de celui-ci perpendiculairement à la direction moyenne du sillon (gravure latérale).

Ainsi, si le signal à enregistrer est un son pur de fréquence $\omega$

$$s = S \cos \omega t$$

le sillon gravé a l'allure d'une sinusoïde plane, enroulée en spirale, d'amplitude constante et de longueur d'onde continûment décroissante de l'extérieur vers l'intérieur du disque :

$$\lambda = 2\pi R \frac{\Omega}{\omega}$$

$\Omega$ étant la vitesse de rotation du disque et R le rayon moyen de la spire au point de la piste considéré.

Le burin graveur est un équipage mécanique entraîné par une force proportionnelle au signal électrique à enregistrer. L'impédance mécanique du burin enfoncé dans le vernis est principalement résistive : à niveau de modulation constant, l'énergie cinétique (et donc la vitesse du burin) est constante et ne dépend pas de la fréquence.

Si le signal électrique s'écrit :

$$s\ (t) = S \cos \omega t$$

la vitesse du burin est :

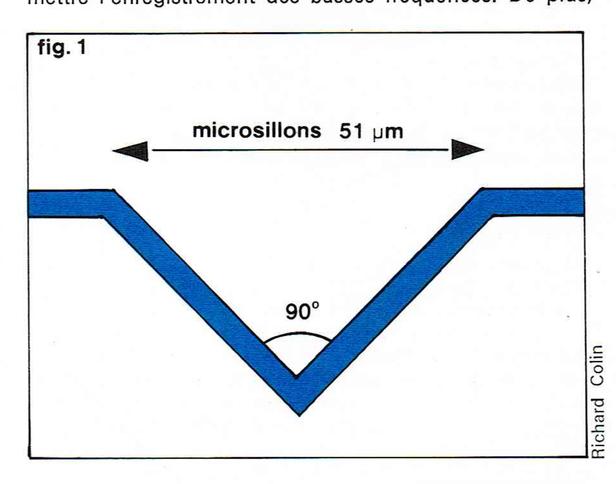
$$V\ (t) = K\, s(t)$$

K étant une constante, et l'amplitude des déplacements du burin est :

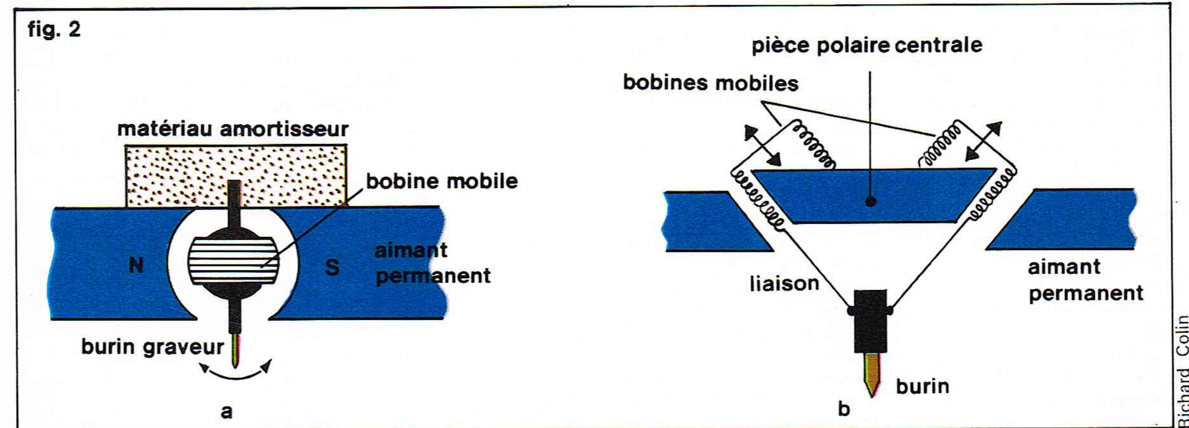
$$\int_0^t V\ (t)\ dt = \frac{K\, s(t)}{\omega}$$

l'amplitude diminue proportionnellement à la fréquence.

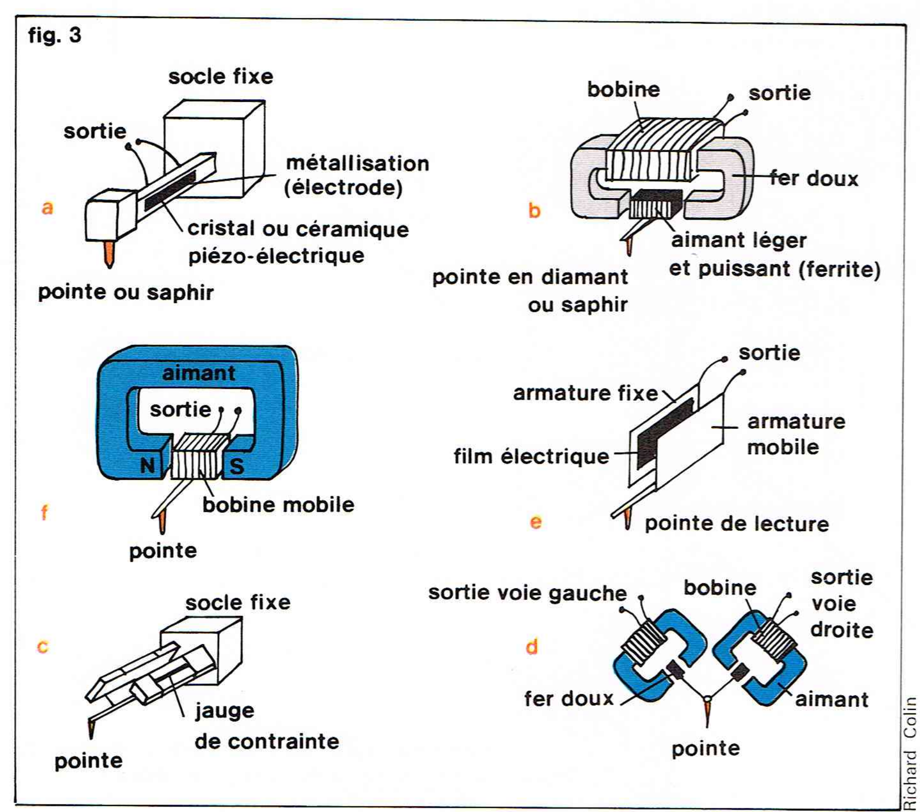
Comme le pas de la spirale doit être déterminé au moins un tour à l'avance, et qu'il doit être suffisamment large pour éviter que les sillons correspondant aux crêtes de modulation ne se chevauchent, on constate qu'une grande partie du disque est gaspillée pour permettre l'enregistrement des basses fréquences. De plus,



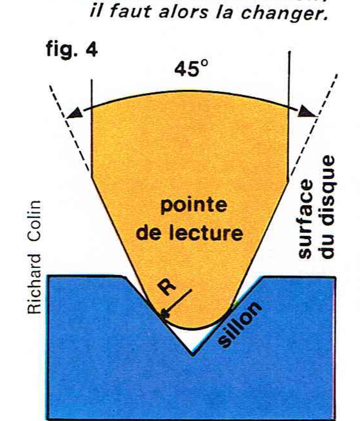

◄ *Figure 1 : coupe d'un sillon de disque microsillon (largeur 51 µm); l'ancien sillon large (78 tours) avait une largeur de 150 µm.*




◄ *Figure 2 ; principe des appareils électrodynamiques de gravure de disques : a, graveur monophonique; b, graveur stéréophonique; un ressort définit la position de repos du burin, et chaque bobine lui impose séparément son déplacement.*




▲ *Figure 3 ; les différentes têtes de lecture pour disques :* a, tête piézo-électrique *(monophonique) ;* b, tête magnétodynamique *(monophonique) ;* c, tête à jauge de contrainte *(stéréophonique) ;* d, *cellule à* réluctance variable *(stéréophonique) ; on réalise les lecteurs stéréophoniques au moyen de deux transducteurs inclinés à 45° ;* e, tête électrostatique *à électret ;* f, tête électrodynamique *(monophonique).*
▼ *Figure 4 : la* pointe de lecture *d'un disque. Pour la gravure en sillon large,* R *doit être compris entre 18 et 26 µm ; en microsillon,* R *est de 13 à 18 µm ; les pointes 18 µm sont donc compatibles ; les pointes sphériques actuelles ont un rayon de l'ordre de 18 µm et permettent la lecture de disques 78 t/mn ; la pointe s'use et finit par atteindre le fond du sillon ; il faut alors la changer.*




le burin doit posséder une dynamique (rapport de la plus grande à la plus petite amplitude de déplacement) très élevée. On pallie cet inconvénient en réduisant l'amplitude des basses fréquences ; de même, on accentue les fréquences élevées qui, sinon, seraient noyées dans le bruit de surface du disque. Ces modifications de dynamique sont fixées par des normes.

### Gravure stéréophonique

Le signal-somme de la voie droite et de la voie gauche (signal monophonique) sert à la gravure latérale précédente, mais la profondeur du sillon est cette fois modulée par la différence des voies droite et gauche. Cette gravure est donc « compatible » : une pointe de lecture sensible uniquement aux mouvements latéraux délivre le signal monophonique seul, exactement comme dans le cas d'une profondeur de sillon fixe. Le signal stéréophonique est obtenu à l'aide d'une pointe équipée de deux transducteurs à 45° qui additionnent et retranchent les vibrations verticales et horizontales, séparant donc les signaux gauche et droit.

### Appareils de gravure

C'est un matériel professionnel de très grande précision, entièrement automatisé. Le plateau est entraîné par un moteur synchrone dont la vitesse est démultipliée. Un signal enregistré sur une piste auxiliaire du magnétophone informe le graveur du niveau moyen du signal à venir lors du prochain tour de plateau, ce qui lui permet de calculer le pas de spirale le mieux adapté : la durée totale d'une face du disque dépend donc du niveau sonore moyen. Cette durée est plus courte en stéréophonie (environ 25 mn) qu'en monophonie (30 mn).

Le graveur est du type électrodynamique (*fig.* 2) ; le déplacement du burin est asservi à la tension de modulation pour limiter les résonances mécaniques. La pointe de gravure est en saphir taillé avec précision. La profondeur moyenne du sillon est réglée par un patin glissant sur le disque ou obtenue par un réglage soigneux de la liberté et de l'amortissement du mouvement vertical. La pointe, chauffée par une résistance électrique, modifie les propriétés mécaniques de la laque : la vitesse de gravure maximale est ainsi augmentée. On minimise le bruit de fond provoqué par les micro-aspérités de la laque gravée en ajustant la composition de cette laque, la profondeur de gravure et la température du burin. Il est environ de — 55 dB à — 60 dB.

### Appareils de lecture

Ces appareils sont largement répandus : leur qualité est très variable ; ils s'attachent tous, en principe, à réaliser une vitesse de rotation du plateau constante et à positionner la pointe de lecture parallèlement au sillon, avec une force de contact très faible pour éviter de détériorer le disque, mais suffisante pour que la pointe ne se décolle pas du sillon et soit guidée par celui-ci.

**Têtes de lecture** (phonocapteurs)

Ce sont des transducteurs mécano-électriques qui doivent produire des tensions suffisantes pour de faibles forces mécaniques. Elles ont en commun un équipage mobile porteur de la pointe de lecture, de faible inertie et dépourvu de résonances aux fréquences utiles. Elles se différencient par leur principe physique de transduction et par leurs caractéristiques tension électrique-déplacement mécanique.

* Les *têtes piézo-électriques* utilisent les propriétés d'un cristal ou d'une céramique qui délivre sur ses faces convenablement taillées une tension proportionnelle à l'amplitude du mouvement de la pointe. Le système normalisé de gravure étant du type à amplitude constante sur une grande partie du spectre, quelques ajustements mécaniques suffisent à conférer à cette tête une réponse en fréquence approximativement linéaire. Cet appareil équipe les tourne-disques de qualité moyenne : il exige une force d'appui sur le sillon élevée (6 à 8 g). En revanche, sa sensibilité est élevée (*fig.* 3a).

* Les *têtes magnétodynamiques* comportent un aimant mobile par rapport à une bobine. Cette technique délivre une tension proportionnelle à la vitesse de la pointe : une correction électronique est alors nécessaire. De plus, la sensibilité est assez faible. Ce système est largement répandu en haute fidélité, car il autorise de faibles forces d'appuis (inférieures au gramme) et une courbe de réponse très régulière (*fig.* 3b).

* Les *têtes à jauge de contrainte* (*fig.* 3c) [résistances sensibles à la déformation d'un support] et les *têtes à réluctance variable* (*fig.* 3d) sont actuellement peu employées.

* Les *têtes électrostatiques* voient présentement leur intérêt renouvelé par l'utilisation des électrets qui les dispensent d'une polarisation continue. L'élément mobile solidaire de la pointe constitue l'armature d'un condensateur polarisé par l'électret. Il en résulte une variation de charge que détecte un amplificateur à haute impédance d'entrée (*fig.* 3e).

* Les *têtes électrodynamiques* (*fig.* 3f) sont très peu sensibles.

* La *pointe* est constituée d'un matériau très dur (saphir pour les appareils « bon marché », diamant synthétique en haute fidélité) [*fig.* 4].

### Défauts de l'enregistrement mécanique

Ces défauts ont en général pour origine l'utilisation d'un système de lecture différent de celui de gravure.

— *Erreur de piste :* l'angle entre la direction de la tête de lecture et le sillon n'est pas nul (comme c'est le cas lors de la gravure), car la tête est supportée par un bras pivotant autour d'un axe.

— *Effet de pince :* la largeur du sillon vue par la pointe de lecture de section arrondie diffère de celle gravée par le burin ; il s'ensuit un mouvement vertical alternatif harmonique du signal gravé.

— *Distorsion de contact :* pour les mêmes raisons de géométrie, le point de contact du sillon et de la pointe de lecture se déplace sur celle-ci, d'où une modulation de phase parasite.

On peut remédier à ces défauts en superposant électroniquement sur le signal enregistré la distorsion inverse de ces distorsions systématiques (simulateur de piste, système « dynagrove »), et en rapprochant la forme de la pointe de lecture de celle du burin (section elliptique au lieu d'être circulaire).

Mais les propriétés élastiques de la matière du disque ont quelquefois pour effet de réduire les distorsions théoriques et rendent incertains les résultats des calculs.

### Réalisation des disques

A partir du modèle directement gravé, on tire des copies : on métallise la laque par dépôt d'argent (réduction d'une solution de nitrate d'argent ammoniacal). Sur

la couche d'argent, on dépose une couche de nickel pour obtenir l'original (le « père ») qui ne sert pas à l'impression (il serait rapidement détérioré). Par le même procédé, on obtient une « mère » à partir du père, qui, par de nouvelles galvanoplasties, fournit plusieurs matrices semblables aux pères. Celles-ci vont servir au passage des disques (quelques centaines de disques par matrice). Le disque moulé est en chloroacétate de polyvinyle ou en polystyrène (*fig.* 5).

Incassable mais facilement rayable, le disque ne supporte pas les températures supérieures à 40 °C (fluage) ni la plupart des solvants organiques (trichloréthylène, etc.). Sa longévité dépend du soin que l'on en prend et de la qualité du système de lecture (la durée d'utilisation est d'environ 1 000 passages).

## *Enregistrement magnétique*

Le magnétophone est connu du public depuis 1945, et s'inspire d'un appareil allemand conçu vers 1931 par la firme AEG. L'idée d'utiliser un support magnétique comme mémoire date de la fin du XIXe siècle.

Les phénomènes magnétiques sont décrits à l'aide de trois grandeurs qui sont : le champ magnétique H, l'induction magnétique B et l'intensité d'aimantation J. H, B et J sont liés par la relation :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J})$$

$\mu_0$ est une constante : c'est la perméabilité du vide. J est une grandeur liée à la matière soumise au champ magnétique. C'est une fonction plus ou moins complexe du champ (J est nul dans le vide).

Pour certains matériaux dits « linéaires », la relation J (H) est simple :

$$\vec{J} = \vec{J_0} + \vec{H}$$

$\vec{J_0} \gg H$ dans le cas des matériaux durs constituant les aimants permanents.

$\vec{J_0} \ll H$ dans le cas des matériaux doux (noyau d'électro-aimants).

Pour d'autres matériaux (non linéaires), la relation entre $\vec{J}$ et $\vec{H}$ dépend également de leur histoire et du sens de variation de $\vec{H}$. On résume alors leurs propriétés par les courbes d'hystérésis (*fig.* 6).

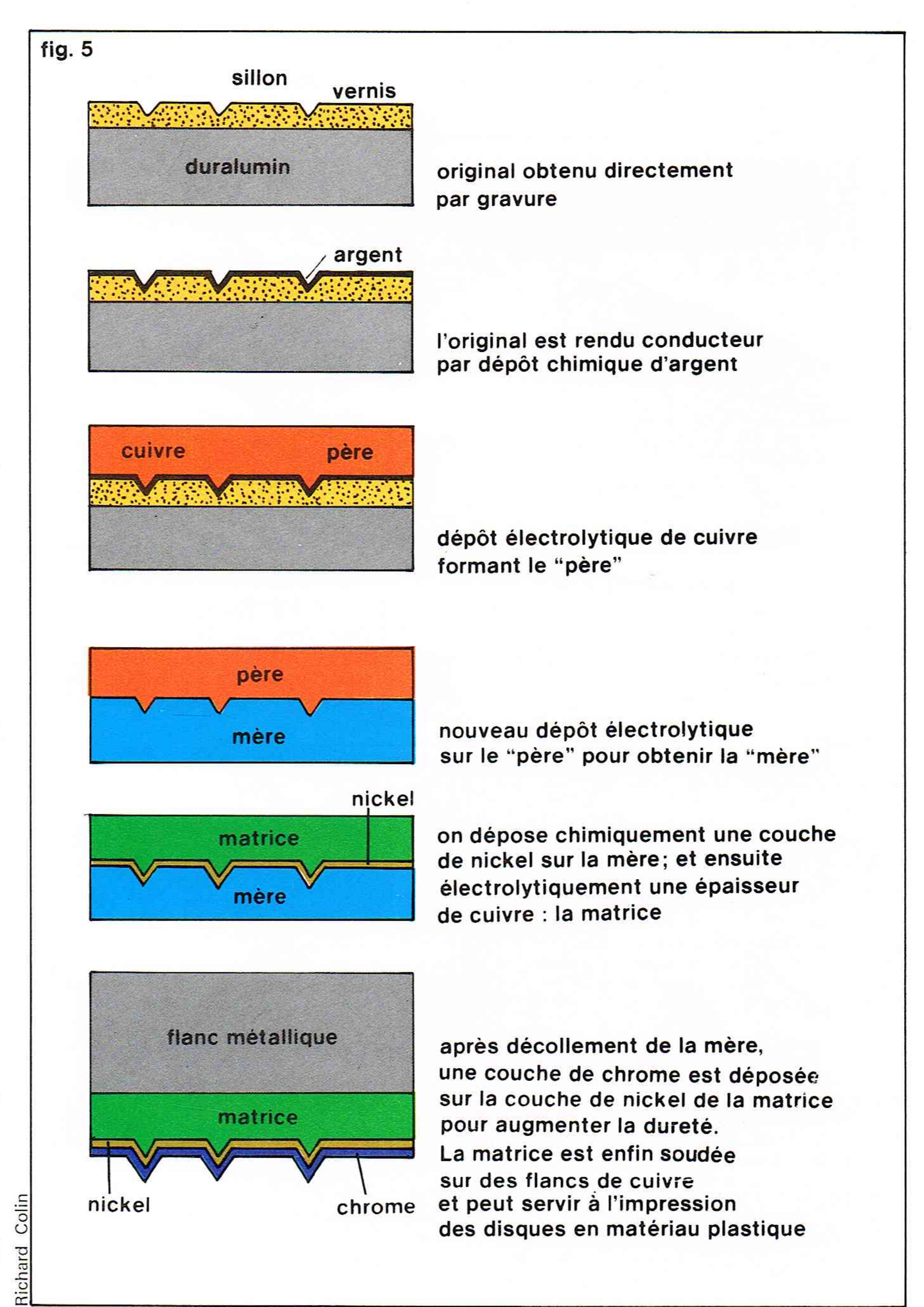
### *La bande magnétique*

C'est un ruban de matériau plastique (polyester) de bonne tenue mécanique recouvert d'une couche d'oxyde magnétique ($Fe_2O_3$ ou $CrO_2$) enrobé dans un liant. Les paramètres magnétiques importants de cette bande sont les valeurs du champ coercitif et de l'aimantation de saturation.

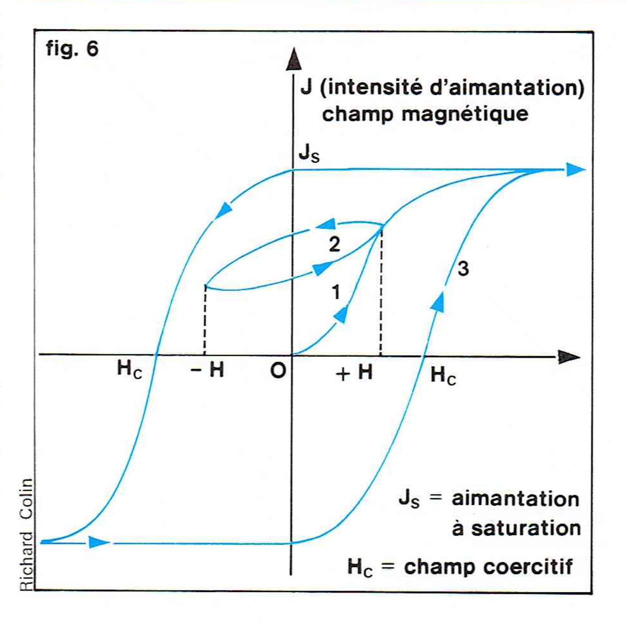
Le champ magnétique d'enregistrement est appliqué parallèlement à la vitesse de déplacement de la bande (*fig.* 7). Cette technique donne un bon rendement aux fréquences élevées. Les dipôles magnétiques de l'oxyde sont d'ailleurs préalablement orientés lors du « couchage » de la bande dans la direction du défilement. On emploie parfois une direction de magnétisation parallèle à la largeur de la bande lorsqu'on n'exige pas une bande passante élevée ni un bon rapport signal sur bruit (synchronisations...). La vitesse V de défilement étant constante, la longueur d'onde de l'aimantation après enregistrement d'un signal de fréquence *f* s'écrit :

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

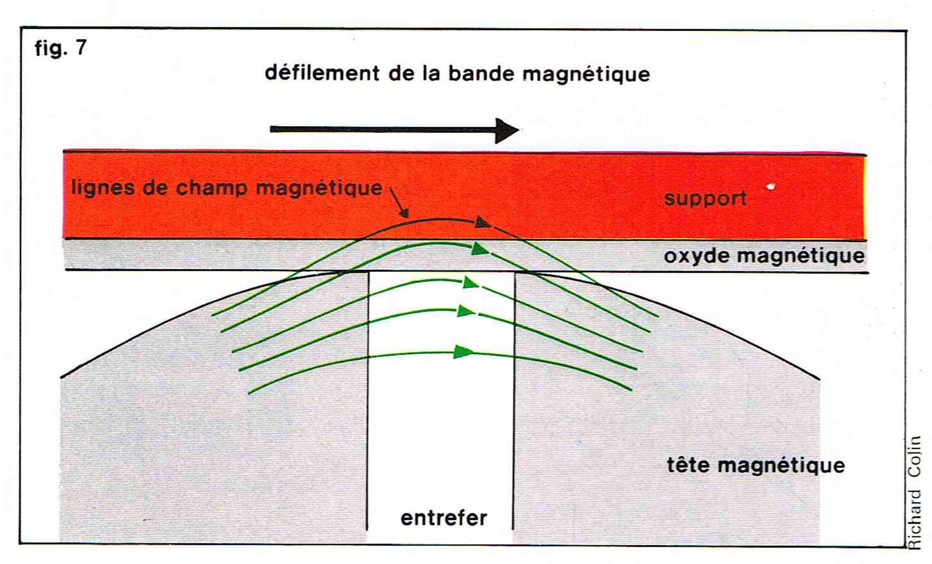
Le champ magnétique est appliqué par une *tête magnétique*. Il est préférable d'employer des têtes différentes pour les fonctions d'effacement, d'enregistrement et de lecture. La tête est un circuit magnétique ouvert par un entrefer très étroit défini par une cale diamagnétique. Le circuit magnétique a une forme torique ou rectangulaire ; il est constitué d'un matériau de perméabilité élevée (mumetal) et feuilleté pour empêcher les courants de Foucault. Les têtes en ferrite ont une moins bonne perméabilité, mais moins de pertes par courants induits, et sont presque inusables (*fig.* 8).

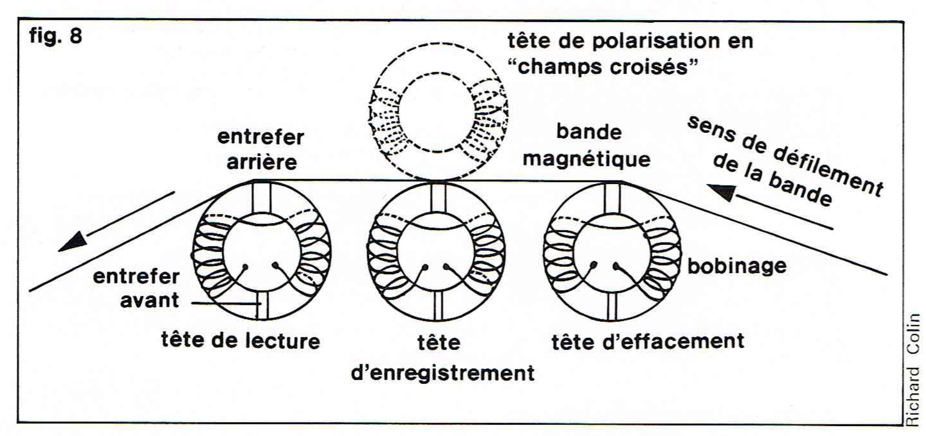



▲ *Figure 5 : principe de la duplication des disques.*




◀ *Figure 6 : cycles d'hystérésis relatifs à l'enregistrement magnétique ; 1, course de première aimantation ; 2, cycle mineur ; le champ varie entre + H et — H ; 3, cycle majeur : il représente le comportement du matériau pour les fortes variations du champ ; c'est l'enveloppe de tous les cycles mineurs.*




▲ *Figure 7 : principe de l'enregistrement et de la lecture magnétique.*

*Figure 8 : disposition des têtes dans un magnétophone.*

▼ *Figure 9 : enregistrement* **sans polarisation.**

*Figure 10 : enregistrement* **avec polarisation continue.**

La bande magnétique glissant devant l'entrefer ferme ce circuit magnétique, et son intensité d'aimantation variable crée une force magnétomotrice à la lecture. A l'enregistrement, le champ magnétique variable aimante plus ou moins la bande. Les variations du champ magnétique sont créées (enregistrement, effacement) ou détectées (lecture) par les bobinages entourant le circuit magnétique.

### *Effacement*

L'effacement par aimant permanent présente l'inconvénient de laisser un signal modulé par les inhomogénéités de la bande; il est totalement abandonné de nos jours. On applique dans l'entrefer un champ magnétique haute fréquence (50 à 150 kHz) d'intensité suffisante pour saturer la bande; lors du passage devant la tête d'effacement, chaque région de la bande est donc soumise à un champ alternatif croissant puis décroissant lentement devant la fréquence : l'aimantation finale est nulle.

Soit R la réluctance du circuit magnétique, le flux créé dans la tête s'écrit :

$$\Phi = \frac{NI}{R}$$

N, nombre de spires de la bobine, I, courant de la bobine.

Le champ magnétique dans l'entrefer est :

$$H = \frac{\Phi}{\mu_0 S}$$

S, section de l'entrefer, $\mu_0$, perméabilité du diélectrique (pratiquement égale à celle du vide).

Les champs magnétiques d'effacement sont de l'ordre de 100 000 A/m.

### *Enregistrement*

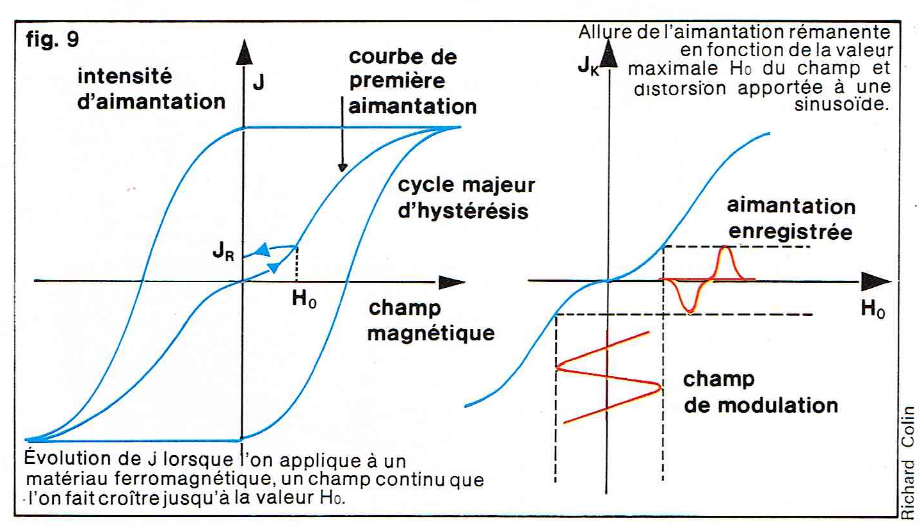
La caractéristique intensité d'aimantation en fonction du champ magnétique n'est pas linéaire (*fig.* 9). Si l'on se contente d'appliquer le signal de modulation aux bornes de la bobine de la tête d'enregistrement, l'intensité d'aimantation sera modulée avec une forte distorsion. On pourrait superposer au signal un courant constant pour assurer une polarisation telle que le signal produise des variations d'intensité d'aimantation dans la région linéaire de la caractéristique (*fig.* 10). Pour des raisons voisines de celles qui ont conduit à l'abandon de l'effacement par un champ continu, on préfère superposer au signal modulé à enregistrer un courant alternatif haute fréquence (souvent identique à celui de la tête d'effacement).

Lorsque la portion de bande magnétisée s'éloigne de la tête d'enregistrement, le champ somme du signal et du champ alternatif de polarisation décroît, et la valeur finale de l'intensité d'aimantation est la valeur moyenne : celle du signal à enregistrer (*fig.* 11). On remarque que l'effacement n'est rien d'autre que l'enregistrement d'un silence par ce procédé. Mais le réglage de l'amplitude du champ de polarisation demande plus de précision que celui du champ d'effacement (ce dernier se contente de saturer la bande). Le champ de prémagnétisation est de l'ordre de dix fois le courant de modulation. On choisit son amplitude en fonction du champ coercitif de l'oxyde et de l'épaisseur de la couche. De ce choix dépendent la distorsion, le niveau de modulation, la courbe de réponse.

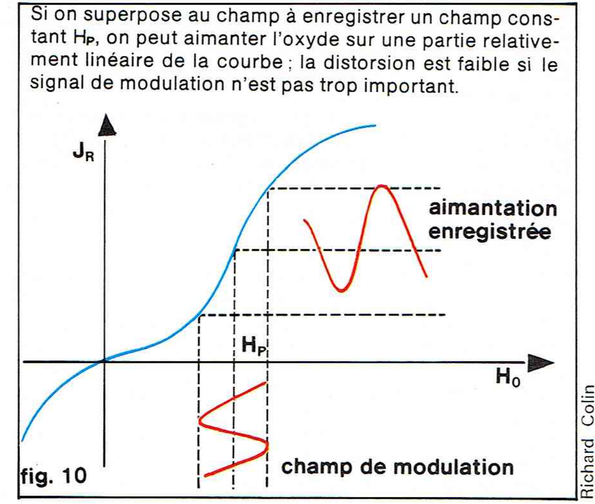
### *Lecture*

Si la longueur d'onde de l'intensité d'aimantation est supérieure à l'épaisseur de l'entrefer, la portion de bande passante devant ce dernier se conduit comme un générateur de force magnétomotrice qui débite dans le circuit constitué par la tête et la portion de bande considérée. La force magnétomotrice s'écrit :

$$f = Je$$

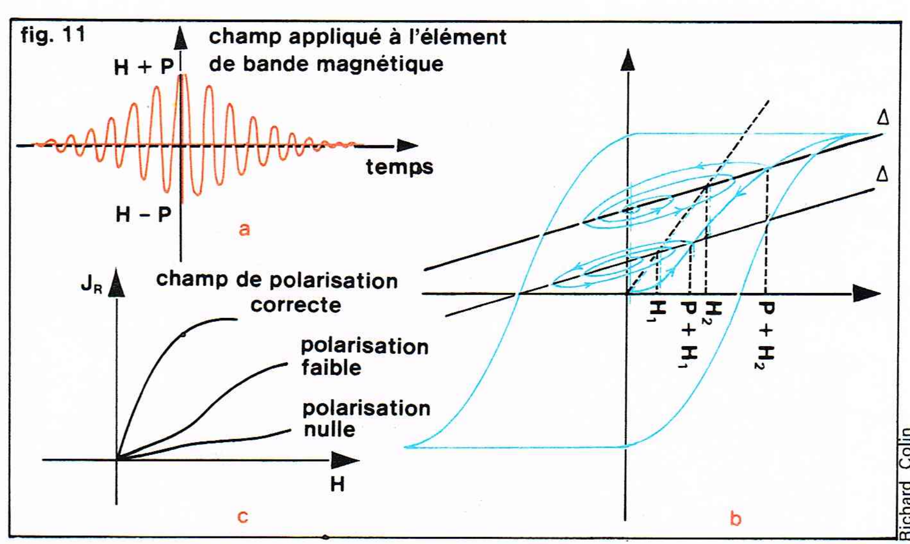



Évolution de J lorsque l'on applique à un matériau ferromagnétique, un champ continu que l'on fait croître jusqu'à la valeur $H_0$.




Si on superpose au champ à enregistrer un champ constant $H_P$, on peut aimanter l'oxyde sur une partie relativement linéaire de la courbe ; la distorsion est faible si le signal de modulation n'est pas trop important.


D. Bouquignaud - TOP



Richard Colin

▲ *A gauche, une interview enregistrée sur magnétophone à Radio-France.*
*A droite, figure 11 :* polarisation alternative ; a, *l'élément de bande magnétique à aimanter est soumis à un champ alternatif croissant puis décroissant ;*
b, *le point représentatif de l'intensité d'aimantation décrit un cycle en forme de spirale ; pour les valeurs différentes* ($H_1$ *et* $H_2$) *du champ à enregistrer la pente de la droite* Δ *varie peu ;*
c, *si* P *est suffisant il y aura une bonne linéarité de* $J_R$ (H).
▼ *Deux étapes de la fabrication des bandes magnétiques.*

*e*, épaisseur de l'entrefer ; J, aimantation de la bande.

Soit R la réluctance du circuit (en général, la réluctance de la tête est négligeable devant celle de la portion de bande). Le flux moyen de la tête s'écrit :

$$\Phi = \frac{Je}{R}$$

Aux bornes de la bobine de la tête de lecture, on récupère la force électromotrice :

$$U = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{e}{R}\frac{dJ}{dt}$$

Par exemple, supposons que le signal enregistré soit sinusoïdal de fréquence *f ;* J est une fonction de la position *x* de la portion lue sur la bande :

$$J = J_0 \cos\frac{2\pi x}{\lambda}$$

La bande se déplace à la vitesse *v* lors de l'enregistrement

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

La lecture s'effectue à la même vitesse :

$$x = vt$$

d'où J lu par la tête de lecture s'écrit :

$$J = J_0 \cos 2\pi ft$$

et la tension de sortie :

$$U = \frac{e}{R} 2\pi N f J_0 \sin 2\pi ft$$

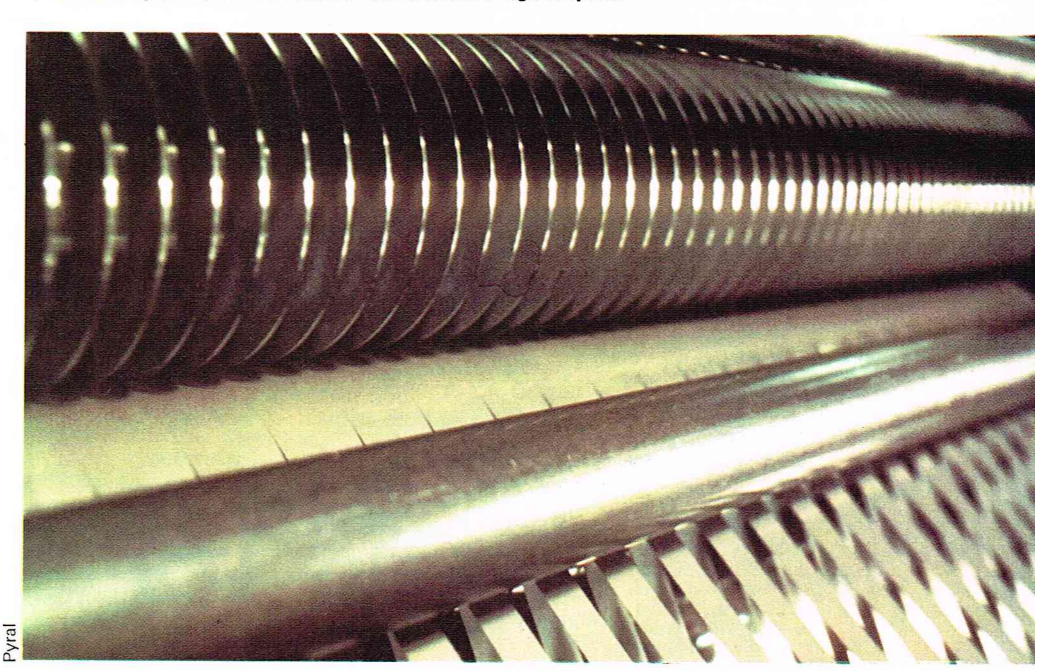
La tension de sortie augmente donc linéairement avec la fréquence ; il est nécessaire de corriger électroniquement cette lecture, puisque l'enregistrement est fait à amplitude d'intensité d'aimantation constante sur la plus grande partie du spectre. La tête est, en particulier, incapable de reproduire un signal continu ($f = 0$). Il existe toutefois des systèmes de têtes tournantes, qui sont donc sensibles à une intensité d'aimantation constante le long de la bande, ainsi que des têtes fixes, d'un principe différent (effet Hall).

Rigoureusement, la force magnétomotrice est l'intégrale de J (*x*) sur toute l'épaisseur de l'entrefer. Dans le cas d'une forme sinusoïdale de J (*x*), la force électromotrice est multipliée par le facteur :

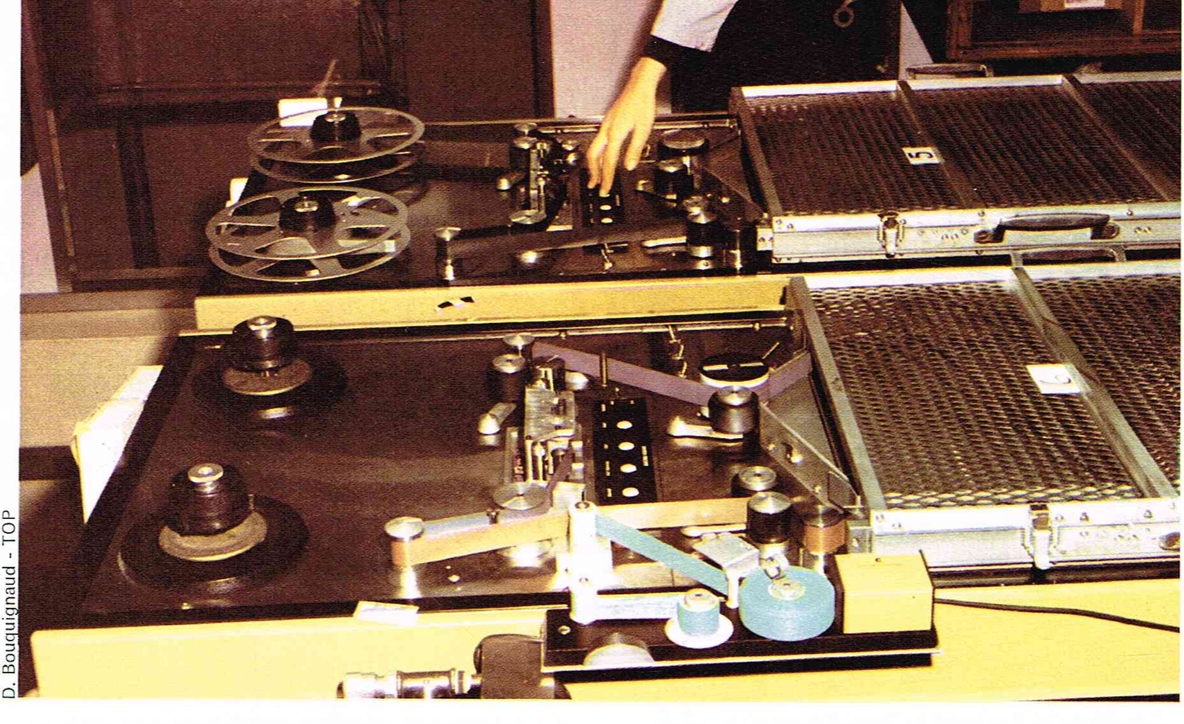
$$K = \frac{\sin u}{u} \text{ avec } u = \frac{\pi e}{\lambda}$$

Lorsque λ est très grand devant *e* (basses fréquences), K est sensiblement égal à l'unité, et le raisonnement précédent reste valable. Pour $\lambda = e$, le signal s'annule une première fois (K = 0) : c'est la longueur d'onde de coupure.

En pratique, la longueur d'onde de coupure est un peu supérieure à *e* (la portion de bande lue s'étend un peu au-delà de l'entrefer). Pour un entrefer courant de 5 microns d'épaisseur, on admet une longueur d'onde limite de 10 microns, ce qui conduit à faire défiler la


Pyral

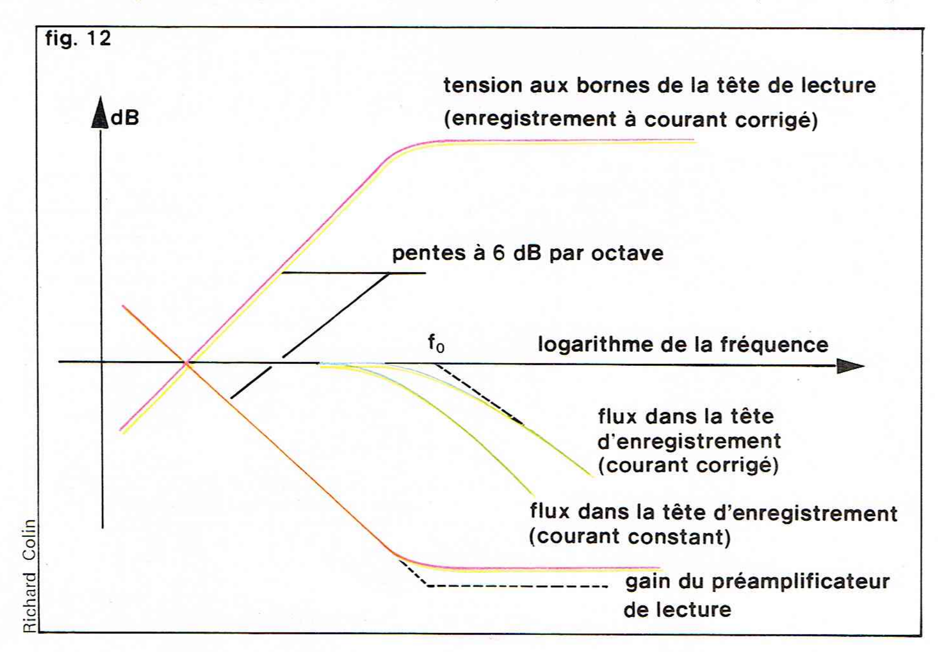

Pyral



▶ *Passage de la bande magnétique mère lors de l'enregistrement et de la fabrication de cassettes chez Pathé-Marconi.*

D. Bouquignaud - TOP

▼ *Figure 12 : corrections à effectuer lors de l'enregistrement et de la lecture de signaux haute fréquence sur bande magnétique ; la valeur de la fréquence $f_0$ est normalisée et dépend de la vitesse de défilement de la bande ; les basses fréquences sont également accentuées lors de l'enregistrement. Pour rendre compatibles tous les magnétophones (bien que leurs têtes de lecture aient des caractéristiques différentes), on impose à l'ensemble tête de lecture-préamplificateur les caractéristiques représentées sur cette figure plutôt que de définir seulement le gain du préamplificateur en supposant la tête de lecture idéale. Chaque constructeur doit ensuite ajuster ses caractéristiques d'enregistrement pour que la courbe de réponse globale soit plate.*




bande à 19 cm/s afin de reproduire la limite des fréquences audibles (20 000 Hz).

De même, si l'entrefer n'est pas parfaitement perpendiculaire à la longueur de la bande (erreur d'azimut), la lecture intègre une plus grande partie de la sinusoïde, et la fréquence de coupure est diminuée. Tout se passe comme si l'entrefer avait l'épaisseur L tg $\alpha$, L étant la largeur de la bande et $\alpha$ l'angle d'erreur d'orientation de la tête.

Les têtes ont des pertes qui augmentent avec la fréquence (hystérésis, courants de Foucault, adaptations d'impédance avec le circuit électronique...). Il n'est donc pas possible d'enregistrer les signaux hautes fréquences à amplitude constante : on modifie la courbe d'enregistrement selon la *figure* 12. La lecture doit évidemment effectuer la correction inverse. Il faut remarquer que l'épaisseur de la couche d'oxyde n'est pas infiniment petite : le calcul de la force magnétomotrice doit faire intervenir l'intégrale de J ($x$) sur cette épaisseur. La portion de bande lue augmente avec la profondeur considérée : la longueur d'onde de coupure croît aussi avec cette profondeur, et les hautes fréquences sont défavorisées. De même, l'éloignement de la bande à la suite d'imperfections mécaniques conduit, lui aussi, à l'affaiblissement des fréquences élevées.

## Normes

Les pertes de lecture peuvent être corrigées à la lecture elle-même, mais la proximité de la saturation en hautes fréquences empêche la correction des pertes d'enregistrement. On normalise donc une partie de ces corrections : le courant d'enregistrement diminue à 6 décibels par octave au-dessus d'une certaine fréquence. A la lecture, la tension aux bornes de la bobine est atténuée à 6 décibels par octave, puis transmise linéairement au-dessus de la fréquence $f_0$.

## Limitations

La bande passante est limitée du côté des basses fréquences par la sensibilité des têtes à la variation du flux (les signaux basses fréquences sont noyés dans le bruit) et par l'influence des portions de bandes voisines de la portion lue dont la corrélation annule le signal en dessous d'une certaine fréquence (longueur d'onde de l'ordre des dimensions de la tête).

Du côté des hautes fréquences, la limite ultime de résolution du support est donnée par les dimensions des aiguilles d'oxyde (de l'ordre du micron). La longueur d'onde minimale est donc de quelques microns, et la fréquence limite d'enregistrement est proportionnelle à la vitesse de défilement de la bande.

## Distorsions

- *Distorsion par harmoniques*. La technique d'enregistrement par polarisation alternative autorise comme principale distorsion le troisième harmonique. Ce troisième harmonique n'est gênant que s'il appartient à la bande passante (basses fréquences).
- *Distorsion par intermodulation*. Elle est surtout sensible pour les fréquences supérieures : intermodulation entre elles ou avec le courant haute fréquence de polarisation.
- Différentes *distorsions d'amplitudes* dépendent de la qualité des bandes et des surfaces mécaniques.

## Bruit

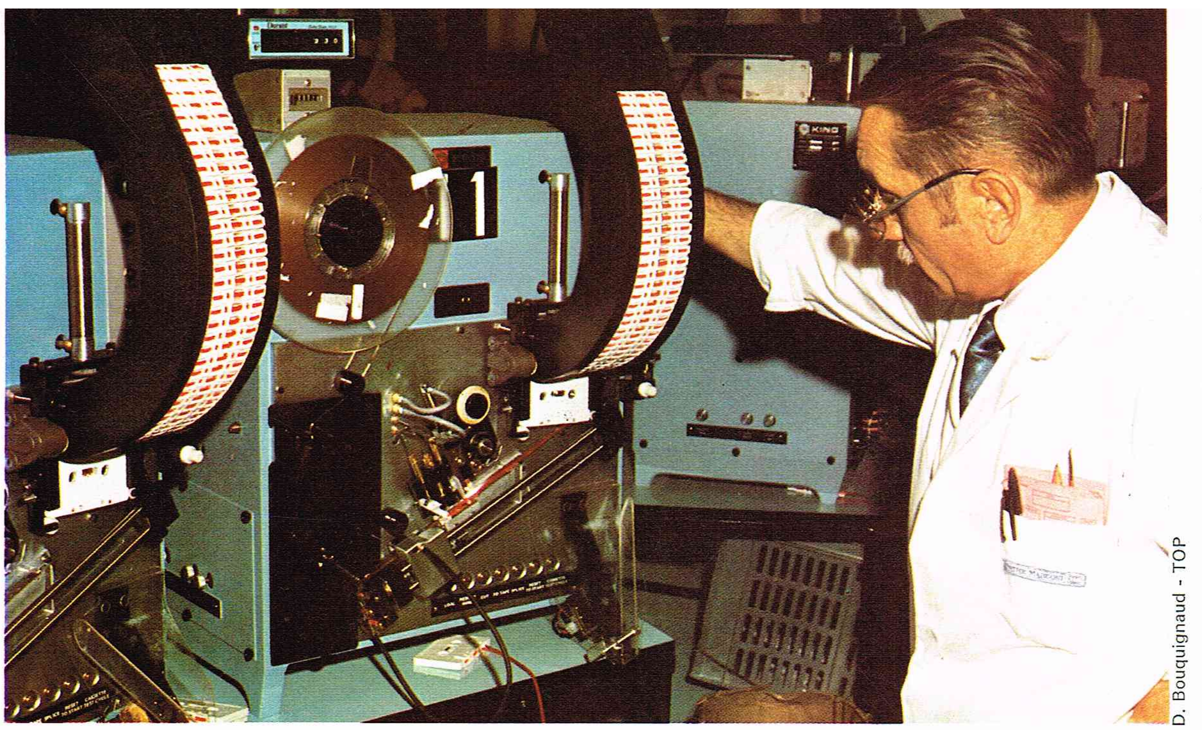
Bruit blanc dû à la structure discontinue de l'oxyde ; la puissance de bruit est proportionnelle à la bande passante ; l'emploi de pistes magnétiques de plus en plus étroites rend dans certains cas nécessaire l'augmentation des sons faibles à l'enregistrement, la lecture rétablissant leur niveau initial : le rapport signal sur bruit reste alors acceptable pour les petits signaux.

Les bandes magnétiques enregistrées peuvent être lues sans baisse de qualité plusieurs milliers de fois. Elles se conservent facilement loin des aimants permanents (proximité d'un haut-parleur par exemple) et du contact direct des métaux.

Les risques de détérioration, qui sont très limités de nos jours, proviennent de la matière du support (dégradation des polymères), et surtout du procédé de couchage de l'oxyde.

## *Industrie de la bande magnétique*

L'enregistrement magnétique est connu depuis longtemps lorsque, à la suite de l'invention de la bande magnétique, apparaît le premier magnétophone digne de ce nom. Dès lors, les supports magnétiques ne cessent



◀ *Machine à monter les cassettes chez Pathé-Marconi.*

D. Bouquignaud - TOP

de s'améliorer, et leur utilisation se généralise dans tous les domaines : cinéma, radio, télévision, ordinateurs, appareils de mesure et même le métropolitain en font une large utilisation. La bande magnétique a remplacé systématiquement les autres supports d'enregistrement chaque fois que l'on n'avait pas besoin d'un grand nombre de copies.

L'enregistrement sur bande magnétique constitue la première étape de tout enregistrement destiné à une grande diffusion, pour laquelle la bande n'est pas tout à fait adaptée : sa duplication n'est pas aussi simple et économique que le pressage d'un disque ou même la copie d'un film de cinéma. Dans des domaines particuliers où le disque est d'un emploi incommode (appareil embarqué sur une automobile par exemple), le support magnétique édité en masse présente un intérêt commercial : la « minicassette » (bande magnétique présentée dans un chargeur) est enregistrée à très grande vitesse sur un appareil spécial.

### Fabrication des bandes magnétiques
(d'après une documentation Pyral)

Le support est en téréphtalate de polyéthylène (le « Mylar » est la marque commerciale d'un produit de ce type). Les largeurs sont normalisées en fractions de pouce (25,4 mm) :

1/8 de pouce (3,12 mm) : bande de minicassette;
1/4 de pouce (6,25 mm) : bande magnétophone à bobine;
1/2 et 1 pouce : bande professionnelle.

Le dos du support est recouvert d'une dorsale dont les propriétés de conduction et de rugosité diminuent la sensibilité aux poussières et favorisent les bobinages rapides. L'épaisseur du support varie entre 20 et 40 microns. L'enduit magnétique est constitué d'un liant et de l'oxyde magnétique, qui est une poudre constituée de particules en forme d'aiguilles (aciculaires) de longueur de l'ordre de 0,7 micron, et de 0,1 micron de diamètre. On l'obtient en transformant dans des fours spéciaux l'oxyde non magnétique $Fe_2O_3\alpha$ en $Fe_3O_4$, puis en $Fe_2O_3\gamma$ magnétique.

Les propriétés du liant sont essentielles : il assure l'adhérence de l'oxyde sur le support et sa répartition, la souplesse de la couche, la résistance à l'usure ainsi que la lubrification (pour éviter l'abrasion trop rapide des têtes). Sa composition fait l'objet de recherches et d'améliorations constantes.

Le couchage est l'opération de dépôt du mélange liant-oxyde sur le support. L'épaisseur de la couche, contrôlée avec précision, est d'environ 10 microns. La bande subit ensuite un traitement de calandrage (passage entre des rouleaux sous pression) destiné à améliorer le contact tête-couche et à diminuer les pertes en haute fréquence. La bande, jusqu'ici en rouleau de 32 à 64 cm de large (« jumbo »), est découpée à la largeur désirée (cette opération demande une grande précision). Enfin, elle subit divers contrôles, et elle est présentée enroulée sur des bobines de différents diamètres.

## *Enregistrement optique*

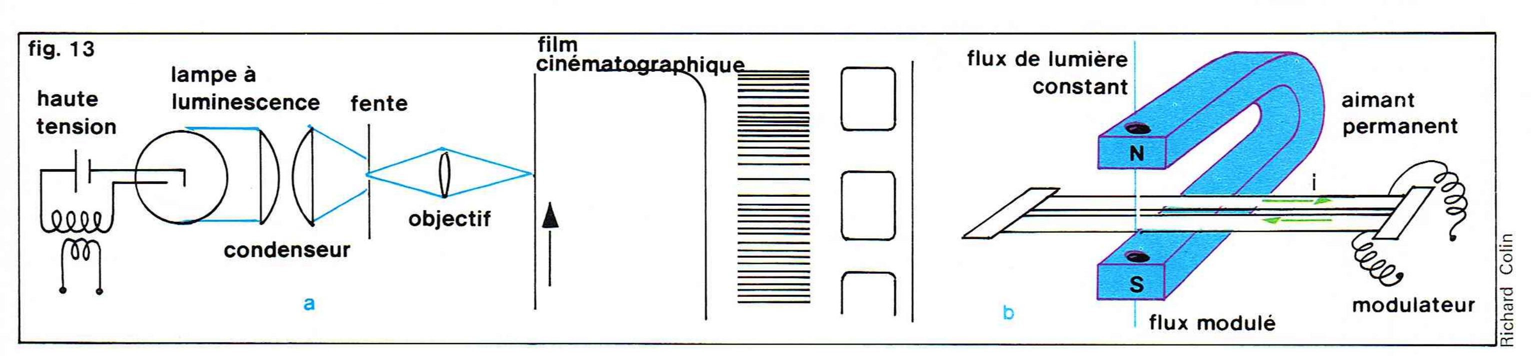
Cette technique est née des besoins du cinéma parlant : la nécessité d'un synchronisme rigoureux entre le son et l'image suggère leur inscription sur un même support. L'idée consiste à moduler au rythme de la fréquence sonore l'intensité d'un flux lumineux. Celui-ci impressionne une piste ménagée parallèlement aux images sur le film cinématographique.

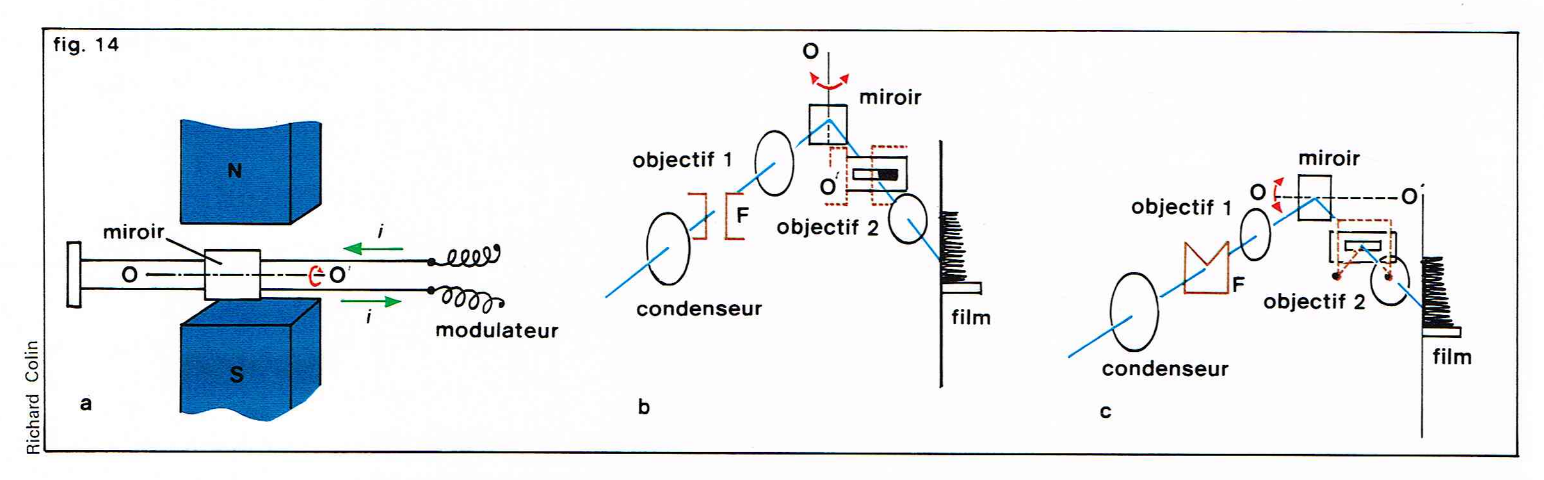
### Modulation de densité

L'idée la plus simple est de moduler la tension d'alimentation d'une lampe à décharge (la lampe à incandescence ayant trop d'inertie), mais la difficulté est alors de maintenir constante la relation entre l'intensité lumineuse et la tension de modulation. Des méthodes d'un principe plus complexe ont donc été étudiées.

Dans le procédé le plus utilisé, le courant de modulation circule dans la boucle que forment deux rubans conducteurs placés dans le champ d'un aimant permanent. Un pinceau lumineux est projeté sur la pellicule cinématographique, au travers de la fente définie par les rubans. La largeur de cette fente dépend de l'intensité du courant (interaction entre le courant et le champ magnétique) et module ainsi la quantité de lumière parvenant sur l'émulsion. La tension mécanique des rubans doit être suffisante pour rejeter leur fréquence de résonance au-dessus de la gamme audible (*fig.* 13).

▼ *Figure 13 : enregistrement optique à densité variable de la piste sonore sur la pellicule d'un film parlant ; a, l'éclairement de la fente varie au rythme de la tension de modulation. L'image de cette fente (une dizaine de µm de largeur) impressionne plus ou moins l'émulsion photographique ; b, ce dispositif remplace la lampe à luminescence variable dans le schéma a.*






▲ *Figure 14 : enregistrement optique* **à densité fixe** *de la piste sonore sur la pellicule d'un film parlant; le miroir vibre au rythme de la modulation autour de l'axe OO′ (a); selon la forme du cache dont l'image est formée par l'objectif 1 sur la fente F, on module de façon unilatérale (b) ou symétrique (c) son image formée sur la pellicule par l'objectif 2.*

Le système à cellule de Kerr (employé quelque temps en Allemagne) utilise le pouvoir rotatoire, sensible au champ électrique, du liquide remplissant la cellule. Celle-ci, placée entre deux polariseurs croisés, intercepte le rayon lumineux dont l'intensité se trouve modulée au rythme du champ électrique. Cette méthode présente l'inconvénient d'exiger des tensions élevées pour la modulation (isolation).

**Modulation à densité constante**

On module cette fois l'étendue de la surface éclairée sur la piste, l'exposition de l'émulsion étant fixe.

L'*oscillographe Blondel* est à la base du procédé : un pinceau lumineux est dévié par le miroir d'un galvanomètre à cadre mobile dont l'impédance mécanique est adaptée au domaine de fréquences à enregistrer; ce pinceau éclaire la pellicule à travers une fente fixe (*fig.* 14). Selon la forme du pinceau lumineux et sa direction de déplacement par rapport à la fente, on obtient une modulation unilatérale ou bilatérale. Dans tous les cas, la lecture est effectuée par une cellule photosensible éclairée à travers la pellicule cinématographique par un pinceau lumineux d'intensité constante.

Le cinéma sonore reproduit les fréquences audibles inférieures à 6 000 hertz : le « grain » ordinaire de l'émulsion photosensible impose alors une vitesse de défilement plus élevée que celle nécessaire à l'illusion du mouvement : 24 images par seconde (soit 45,6 cm/s) au lieu de 16 images par seconde.

Des remarques concernant la nécessité de vitesses constantes tant à l'enregistrement qu'à la lecture, ou encore l'alignement des fentes d'éclairages et leurs épaisseurs, se déduisent aisément de l'exemple de l'enregistrement sur bande magnétique.

Les propriétés photosensibles des émulsions (sensitométries) agissent sur la distorsion. Les tolérances sont particulièrement étroites en modulation à densité variable.

L'inconvénient majeur de l'enregistrement optique est l'impossibilité d'effacer : cette technique ne présente d'intérêt que pour la copie des films, et n'est utilisée que lors du repiquage; toutes les autres opérations sont effectuées sur bande magnétique perforée. Par ailleurs, le « pistage » du film par une ou plusieurs bandes magnétiques s'impose dans le cas des reproductions multicanaux (cinémascope, cinérama) et pour le cinéma amateur. Il existe des systèmes mixtes optiques et magnétiques à des fins de compatibilité.

## *La haute fidélité*

### *Généralités*

La définition de fidélité en matière de reproduction sonore est en relation étroite avec l'état des connaissances acquises sur notre sens auditif. Certains critères, dits objectifs, sont facilement mesurables. D'autres, subjectifs, se fondent sur les impressions d'un échantillon d'auditeurs. Les possibilités de la technique et divers compromis entre ces éléments aboutissent à des réalisations dont les performances sont définies par des normes. Les normes s'alignent avec un certain retard sur les progrès des constructeurs. On trouve donc à l'intérieur du label haute fidélité des appareils de possibilités très variables. Enfin, au-dessus d'une certaine qualité, déjà très supérieure aux normes en vigueur, il n'existe plus vraiment de critères objectifs, et le choix est affaire de goût personnel.

Les principaux critères objectifs de fidélité sont étudiés ci-après :

● **La bande passante.** On appelle son de fréquence audible tout son pur (variation sinusoïdale de la pression de l'air de fréquence fixe et de durée grande devant la période) perçu par l'oreille. L'étendue des fréquences transmises par l'appareil doit au moins couvrir la bande des fréquences audibles (20 à 20 000 hertz). Mais un son réel comprend, en général, des transitoires rapides (coup de cymbale...) dont le spectre de fréquences s'étend dans le domaine ultrasonore (comme le montre une décomposition en série de Fourier). Il semble que la reconstitution du son avec ses transitoires soit utile à la fidélité de l'impression auditive, ce qui justifie l'extension de la bande passante des appareils aux fréquences ultrasonores.

● **La dynamique.** La sensibilité de l'oreille est approximativement logarithmique, c'est-à-dire que l'impression de niveau sonore augmente beaucoup moins vite que la pression acoustique (seule grandeur physique liée à l'intensité du son qui soit mesurable). On transforme donc l'échelle des pressions sonores en échelle de décibels.

Le niveau de pression acoustique évalué en décibels s'écrit :

$$N = 20 \text{ Log } \frac{P}{P_0}$$

P est la pression acoustique, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ pascal correspond au seuil de l'audition moyenne à environ 1 000 hertz. Ainsi, à 0 décibel correspond le silence parfait pour la plupart des gens. Le seuil de la douleur survient autour de 120 décibels, soit pour une pression acoustique de l'ordre de 20 pascals (0,2 ‰ de la pression atmosphérique). La dynamique représente en décibels le rapport entre les pressions maximales et minimales reproduites. Une dynamique de 90 décibels est courante dans un passage musical, mais la « haute fidélité » n'en exige que 60.

● **Le bruit.** L'oreille est sensible au rapport signal sur bruit : en présence d'un son fort, un son faible paraît encore plus faible et un message sonore d'intensité un peu inférieure au bruit est inintelligible.

Les critères subjectifs sont nombreux et discutables. Il semble toutefois que l'oreille soit très sensible à l'équilibre tonal d'un son : il est possible d'amputer les extrémités de la bande passante, à condition de respecter une certaine symétrie. La notion du timbre d'un son est propre à l'oreille : alors que l'impression de hauteur d'un son pur s'identifie avec la fréquence, cette même hauteur semble fixée par l'harmonique de fréquence la plus faible (fondamental) dans le cas d'un son réel complexe (note de piano par exemple).

La restitution du relief sonore (audition binaurale) est en première approximation obtenue par la reproduction séparée des sons provenant de la droite et de la gauche de l'auditeur (stéréophonie).

## Constitution d'une chaîne haute fidélité

### L'amplificateur

C'est le centre nerveux de l'installation; sa tâche est répartie entre deux étages.

**L'amplification bas niveau (préamplification)**

Son rôle est d'amplifier les signaux électriques faibles à la sortie d'un transducteur (phonocapteurs, microphones) ou d'un autre préamplificateur (tuner, magnétophone) [*fig.* 15]. Elle assure les principaux réglages.

- *Sélection de l'entrée :* pour ne pas avoir à retoucher le volume lors de la commutation de niveaux différents (pick-up magnétique et tuner par exemple), le gain moyen est ajusté par le changement de la boucle de contre-réaction. C'est par cette même boucle que sont modifiées les caractéristiques gain-fréquences propres à chaque voie d'entrée.
- *Réglage de tonalité :* il favorise à volonté les fréquences graves ou aiguës et, dans les systèmes élaborés, une troisième commande agit sur les médiums. L'intérêt de ce dispositif est de compenser approximativement l'imperfection d'un enregistrement, d'un haut-parleur ou de l'acoustique du local d'écoute.
- *Réglage de volume :* il agit sur le niveau général de sortie de l'amplificateur.
- *Réglage de balance :* il modifie le niveau relatif des voies gauche et droite.
- Les *filtres* permettent d'éliminer les défauts d'un enregistrement ou d'un transducteur non adapté à la large bande de l'amplificateur (bruit d'aiguille des anciens disques et phonocapteurs dont le spectre recoupe l'extrême aigu de la bande audible, saturation en basse fréquence provoquée par un disque déformé).
- Le *correcteur physiologique :* il est chargé de compenser la perte de sensibilité aux extrémités du spectre (basses fréquences principalement) présentée par l'oreille humaine aux faibles niveaux sonores (courbe de Fletcher).

Le bruit électronique dépend de la qualité du préamplificateur; c'est la partie la plus sensible aux perturbations extérieures de l'amplificateur. Les progrès des circuits intégrés analogiques en terme de bruit expliquent leur emploi croissant dans cet élément.

**L'amplificateur de puissance**

Il est presque toujours du type « push-pull » à alimentation série. Le couplage avec la charge se fait directement ou par capacité, plus rarement par transformateur (réservé aux fortes puissances). Dans le détail, chaque constructeur apporte ses variantes, mais l'essentiel est contenu dans quelques schémas de base, et finalement les caractéristiques obtenues sont très semblables. Il faut surveiller principalement la stabilité des points de polarisation, l'équilibre dynamique du push-pull, et surtout la bande passante du transistor d'attaque qui doit éliminer les distorsions de raccordement (boucle de contre-réaction). La puissance de l'amplificateur dépend de la dynamique à reproduire et du rendement des charges acoustiques (haut-parleurs). Elle oscille entre 5 et 200 watts, mais une vingtaine de watts semble être un minimum pour la plupart des systèmes haut-parleurs de qualité. La distorsion introduite par l'amplificateur est de l'ordre du pour mille. Le rapport signal sur bruit atteint facilement 60 décibels.

### Les tables de lecture

Elles assurent la rotation régulière du plateau entraînant le disque. La perfection de ce mouvement est doublement obtenue par la qualité de la construction mécanique et par une régulation ou même un asservissement électronique. Différentes solutions sont retenues par les constructeurs pour établir la liaison entre le moteur et le plateau (entraînement par galet ou par courroie). Pour réduire les risques d'usure de ces transmissions, certaines réalisations ont un plateau solidaire de la partie tournante du moteur (entraînement direct). Outre les fluctuations de vitesse du plateau (pleurage et scintillement), il faut éliminer les vibrations parasites, qu'elles proviennent des pièces en mouvement elles-mêmes ou de l'extérieur. La suspension et l'amortissement du plateau sont réglés à cet effet.

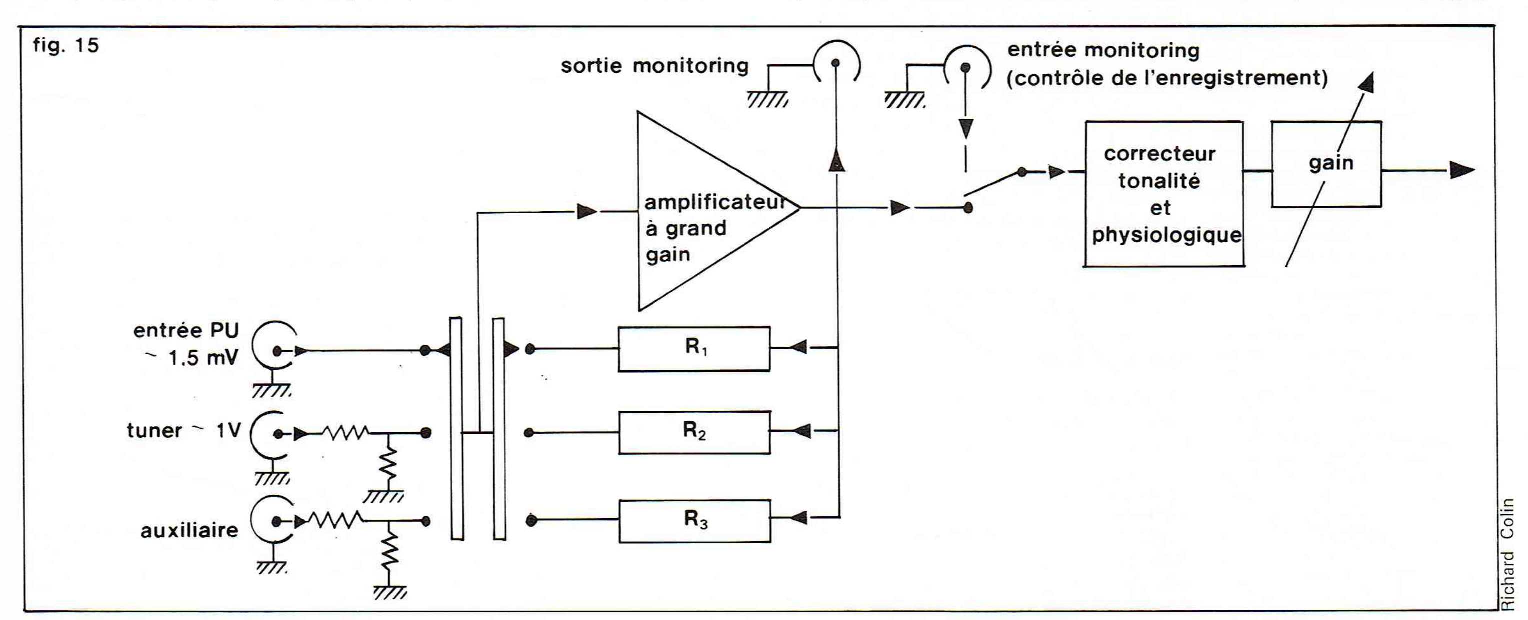
Il n'est pas facile de concevoir un système mécanique suffisamment simple capable de maintenir la tête de

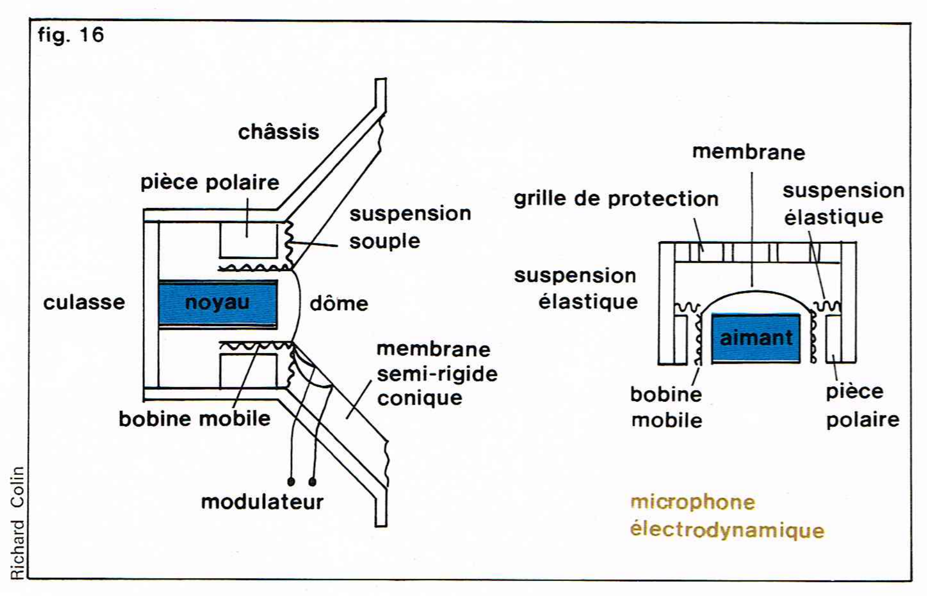


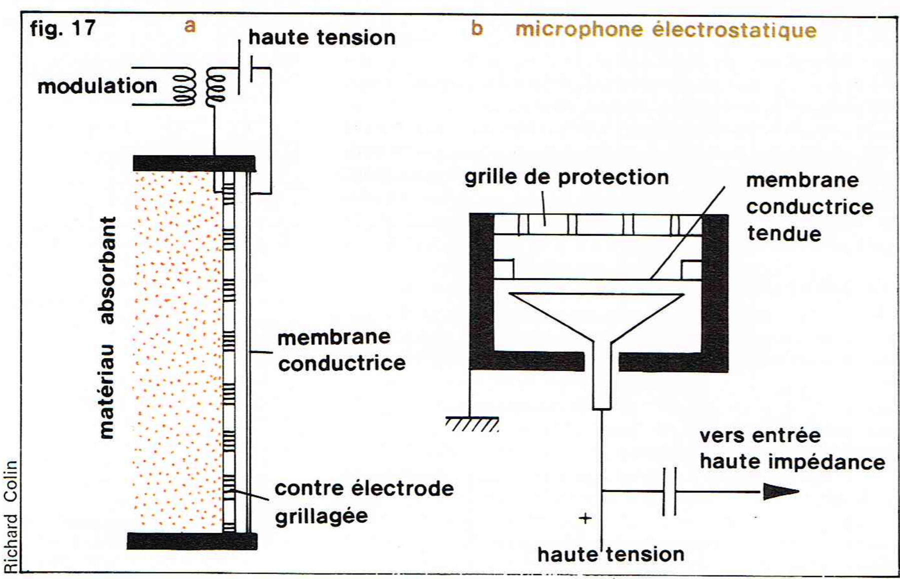
Cliché Thomson - CSF - Jacques Pierre

*▲ Transistors de puissance fabriqués par Sescosem. Ceux-ci sont utilisés dans les amplificateurs de puissance.*

*▼ Figure 15 : bloc diagramme d'un préamplificateur. Les réseaux de contre-réaction $R_1$, $R_2$, $R_3$ ont le double rôle d'ajuster le gain du préamplificateur au niveau d'entrée et de satisfaire les caractéristiques d'égalisation de bande passante; certaines corrections comme l'égalisation des phonolecteurs sont normalement demandées au préamplificateur tandis que d'autres, comme la désaccentuation des fréquences aiguës en modulation de fréquence, sont effectuées directement à la détection. Certains préamplificateurs utilisent un amplificateur différent pour les entrées bas niveau et haut niveau.*









▲ *Figure 16 : représentation schématique d'un* haut-parleur électrodynamique.
*Figure 17 : représentation schématique d'un* haut-parleur électrostatique (a) *et d'un* microphone électrostatique (b) *; les microphones et haut-parleurs d'un même principe obéissent en première approximation à des équations électromécaniques linéaires réversibles; ils diffèrent pourtant par le choix des impédances mécaniques et par leur puissance. Ainsi, un haut-parleur électrodynamique est un excellent microphone au-dessus de sa fréquence de résonance (quelques dizaines de hertz), alors qu'un microphone électrodynamique est un très bon haut-parleur d'aigus au-dessus de sa résonance (10 000 hertz).*

lecture parallèle à la direction des sillons sur toute l'étendue du disque. Cela est toutefois possible à condition d'utiliser un capteur auxiliaire informant un dispositif électronique de la position du sillon à lire : le bras se déplace dans son ensemble et conserve alors une direction fixe. Il est plus commode de tolérer une certaine erreur de parallélisme (erreur de piste) et d'employer un bras pivotant horizontalement autour d'un point fixe. De plus, la surface des disques est rarement parfaitement plane, et ils n'ont pas tous la même épaisseur : le bras doit être mobile dans le plan vertical. Il existe de nombreuses solutions mécaniques pour obtenir cette liberté (suspension à la Cardan, unipivot et couteaux...). Là encore, l'amortissement des résonances est essentiel (résonances basse fréquence du bras et de son contrepoids).

Ces diverses réalisations techniques ont une grande partie de leurs performances soumises à des normes. Longtemps banni des platines tourne-disques haute fidélité, l'automatisme de la pose du bras et du retour sur son support a refait une apparition appréciée.

### L'enceinte acoustique

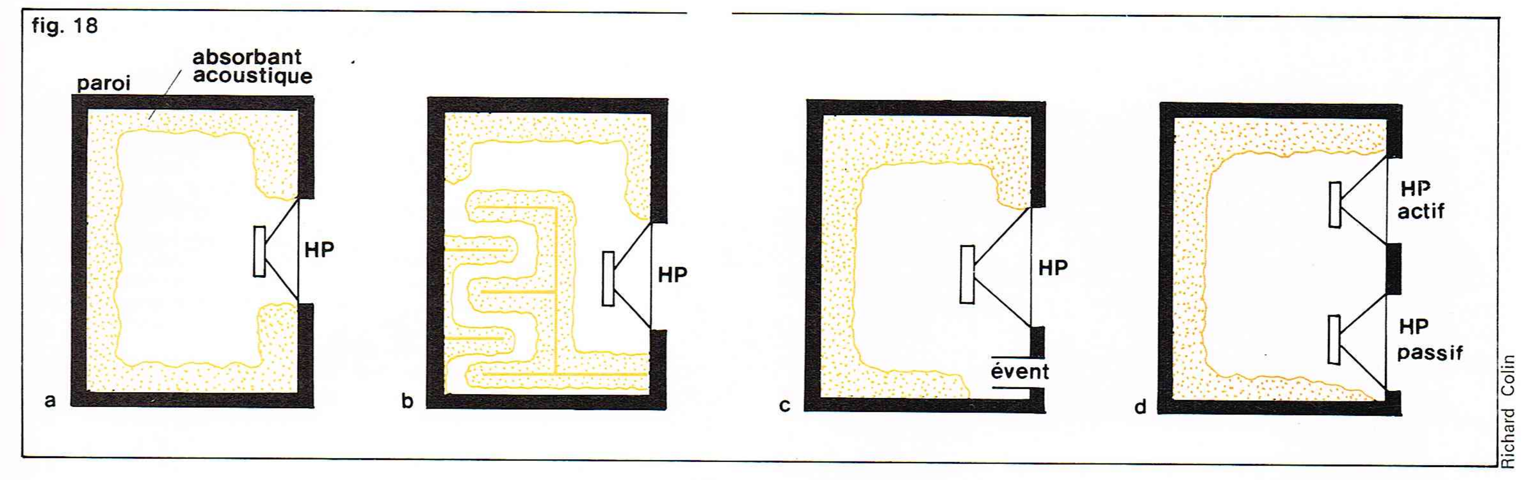
Elle est très souvent l'élément le plus critiquable d'une chaîne haute fidélité. On lui demande de produire une pression acoustique qui soit l'image fidèle de la tension délivrée par l'amplificateur de puissance. On tente d'obtenir ce résultat avec des combinaisons de haut-parleurs.

Les systèmes haut-parleurs sont principalement *électrodynamiques :* leur membrane est solidaire d'une bobine mobile dans le champ d'un aimant permanent puissant (*fig.* 16). Cette bobine, parcourue par le courant de modulation, met la membrane et donc l'air avoisinant en vibration.

Le *haut-parleur électrostatique* utilise comme membrane vibrante l'armature d'un condensateur plan. Son emploi est peu répandu (*fig.* 17). En basse et en moyenne fréquence, il est beaucoup plus encombrant à puissance égale que le haut-parleur électrodynamique, et il nécessite une alimentation particulière. En contrepartie, ses performances mécaniques et son rendement sont plus élevés (répartition de la force sur toute la surface en mouvement).

Les pressions acoustiques créées par le mouvement de la membrane en avant et en arrière du haut-parleur sont en opposition de phase. Pour des fréquences suffisamment basses, ces deux ondes interfèrent et s'annulent au niveau de l'auditeur. Il est difficile d'isoler ce dernier de l'onde arrière (disposition dite du « baffle infini » : le haut-parleur est monté sur un écran de dimensions très grandes devant la longueur d'onde). On se contente d'enfermer l'onde arrière dans une boîte étanche (enceintes closes) convenablement amortie par un matériau absorbant du son (laine de verre...) pour limiter les résonances. On se rapproche ainsi des conditions du *baffle infini* (*fig.* 18a).

La membrane du haut-parleur électrodynamique est soumise à une force proportionnelle au courant dans la bobine. La pression acoustique créée par la surface avant d'une membrane vibrante est constante si l'accélération de celle-ci est constante. A niveau de modulation constant, l'accélération de la membrane ne dépend pas de la




fréquence si l'impédance mécanique de l'élément mobile est une masse pure.

En première approximation, on peut assimiler le mouvement de la membrane à celui d'un système mécanique résonnant (masse maintenue à une position d'équilibre par un ressort, en présence de frottement). L'impédance mécanique d'un tel système est purement résistive (frottement) à la résonance ; elle devient liée à la raideur du ressort aux fréquences inférieures à la résonance et à la masse du système au-dessus de celle-ci : le haut-parleur électrodynamique est donc utilisé au-dessus de sa fréquence de résonance, qui est elle-même très amortie (frottement important). En dessous de cette fréquence, la pression acoustique chute rapidement.

Au lieu d'étouffer l'onde arrière, on peut la renvoyer vers l'avant à condition de la mettre en phase avec l'onde directe : c'est le principe des *enceintes à labyrinthe :* l'onde arrière parcourt un chemin contourné et débouche, convenablement retardée, à côté de la face avant du haut-parleur (*fig.* 18b).

Les enceintes *bass reflex* utilisent le principe du résonateur de Helmholtz (la masse du volume d'air correspondant au trou découpé dans la face avant de l'enceinte résonne avec l'élasticité du haut-parleur en basse fréquence et du volume d'air de l'enceinte aux fréquences moyennes) [*fig.* 18c].

Les enceintes *actif-passif* emploient un haut-parleur non alimenté comme élément résonnant (*fig.* 18d).

Ces deux procédés ont pour but d'étendre la bande passante vers les basses fréquences en créant une résonance supplémentaire convenablement amortie.

Pour les hautes fréquences (longueur d'onde inférieure au diamètre du haut-parleur), le rayonnement devient très directif et l'impédance mécanique souhaitable du haut-parleur est résistive : le haut-parleur servant à la reproduction des graves n'est donc plus utilisable, sauf si le mode de vibration n'est plus le même (déformation de la membrane). On obtient un résultat acceptable en construisant des membranes dont le diamètre actif diminue quand la fréquence augmente, ce qui présente le double avantage de maintenir le niveau sonore constant et de réduire la directivité.

Mais pour reproduire correctement toute l'étendue des fréquences audibles, il est souvent avantageux d'utiliser deux ou trois haut-parleurs (haut-parleur grave, médium, aigu [*fig.* 19]) alimentés par l'intermédiaire de filtres. Le problème est alors de faire rayonner ces différents transducteurs avec la même phase.

On améliore la bande passante pour les fréquences inférieures à quelques centaines de hertz, en asservissant les mouvements de la membrane à la tension électrique : le gain de l'amplificateur de puissance est modifié par la tension d'un accéléromètre solidaire de celle-ci. La reproduction des basses fréquences n'est limitée dans ce cas que par la puissance de l'amplificateur et le débattement de la bobine mobile. Enfin, il faut savoir que la régularité de la bande passante est une condition nécessaire mais non suffisante de la qualité. On peut citer, comme autre critère, les réponses à une impulsion ou à un train d'onde, et une quantité d'éléments subjectifs résultant souvent d'interférences constructives ou destructives entre de petits défauts objectifs.

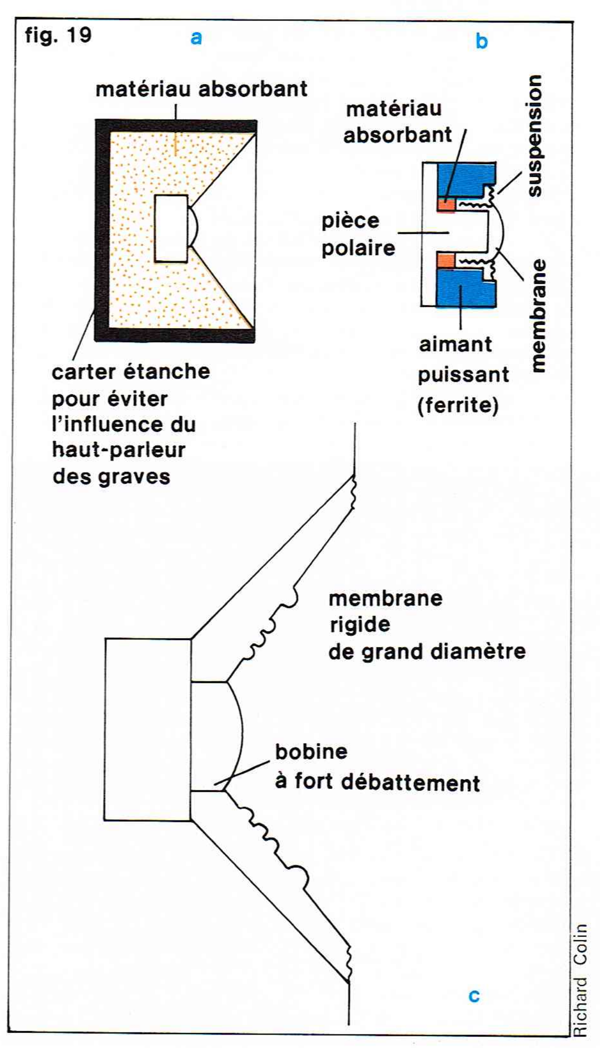
***Le « tuner » haute fidélité***

Dans cet appareil, qui est en fait un poste de radio d'excellente qualité dépourvu d'amplificateurs de puissance, le qualificatif haute fidélité ne s'applique, bien entendu, qu'aux émissions en modulation de fréquence, bien qu'il soit également équipé pour la réception de la modulation d'amplitude. Dans ce dernier cas, la faible amélioration de la qualité du son ne justifie pas l'inconvénient d'un poste fixe. Son fonctionnement correct exige une installation d'antenne appropriée.

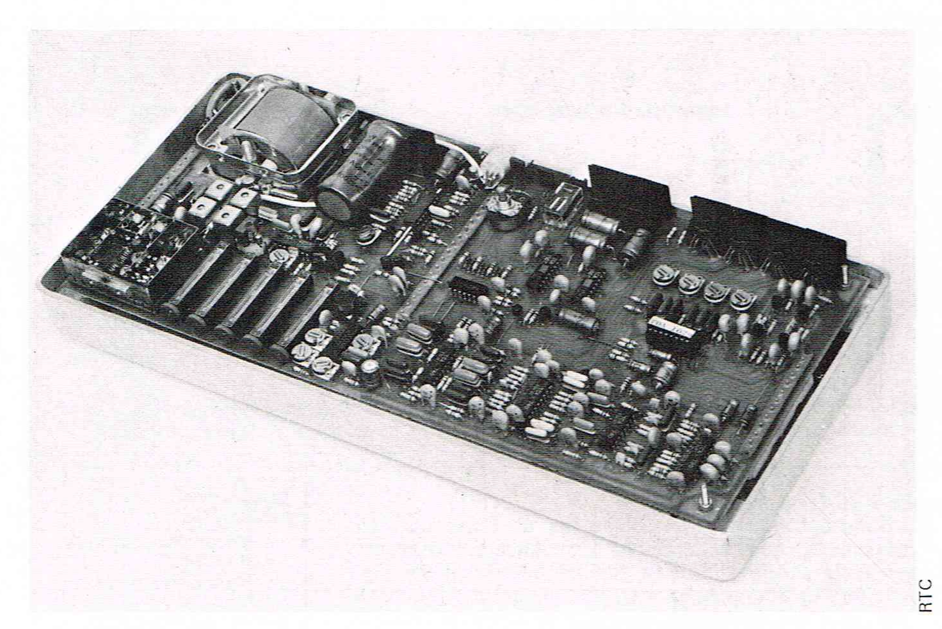
Ces appareils possèdent deux types de commande d'accord sur les stations : un réglage manuel d'une part, et un certain nombre de touches préréglées d'autre part, qui permettent de sélectionner immédiatement la station désirée. Une touche supplémentaire (commande automatique de fréquence CAF) opère un accord automatique

***▲ Figure 18 : différents types d'enceintes acoustiques ; a, baffle clos ; b, baffle à labyrinthe ; c, baffle bass reflex ; d, baffle actif-passif.***

***◀ Page ci-contre, à droite, différentes pièces d'une chaîne haute fidélité Thorens ; en haut, le tuner ; au centre, l'amplificateur ; en bas, la platine.***




***◀ Figure 19 : les trois types de haut-parleurs utilisés pour reproduire toute l'étendue des fréquences audibles ; a, haut-parleur de fréquences moyennes ; b, haut-parleur d'aiguës à dôme ; c, haut-parleur de graves.***



RTC

▲ *Ensemble d'un récepteur à modulation de fréquence haute fidélité à recherche automatique de stations utilisant les circuits intégrés analogiques.*

sur la station suffisamment proche du réglage obtenu manuellement. Souvent un voyant s'allume lors des émissions stéréophoniques. Son intérêt est moins d'avertir l'auditeur de la qualité de l'émission (il est censé s'en apercevoir tout seul), que de lui signaler qu'il est éventuellement possible d'améliorer la qualité d'une réception défectueuse en passant en monophonie (la monophonie est moins sensible que la stéréophonie aux perturbations de transmissions).

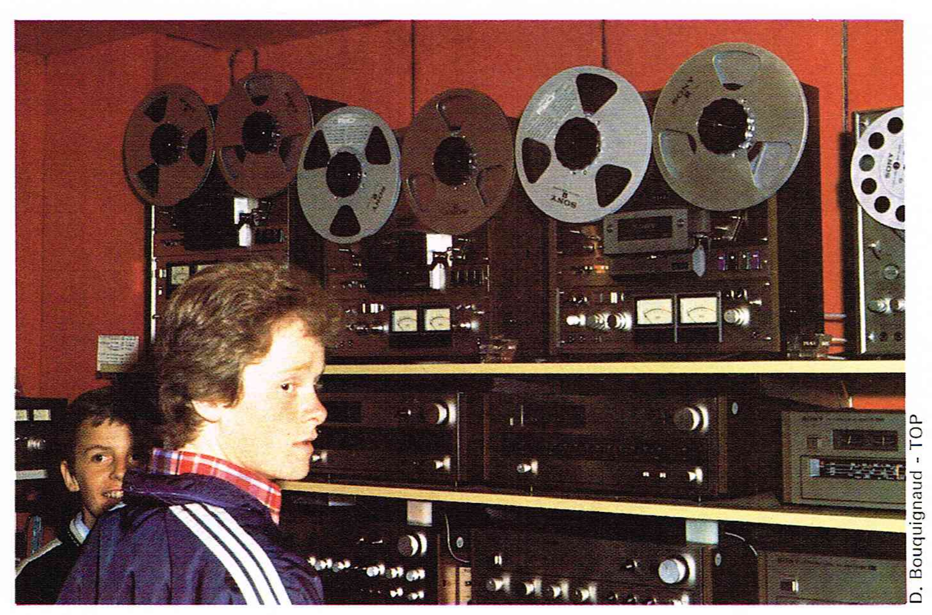
### *Le magnétophone*

Cet appareil est de plus en plus considéré comme un maillon important de la chaîne haute fidélité. Les magnétophones bénéficient maintenant des progrès qu'avait rendus indispensables le développement des minicassettes : en particulier, ils sont équipés de systèmes réducteurs de bruit jusqu'alors réservés aux professionnels (« Dolby », système « DNL » de Philips). D'un principe voisin, ces dispositifs sont, hélas, suffisamment différents pour qu'ils ne soient pas compatibles.

La « minicassette » elle-même permet des enregistrements en haute fidélité sur certains appareils perfectionnés. Sa commodité d'emploi pour l'amateur qui effectue peu de manipulations (comme le montage de différentes bandes) explique l'apparition des cassettes utilisant une bande d'1/2 pouce, contre 1/4 de pouce pour la « minicassette ».

Les magnétophones ont des systèmes multipistes à 2 ou 4 canaux (magnétophones stéréophoniques).

▼ *Les magnétophones sont de plus en plus considérés comme un maillon important de la chaîne haute fidélité; ils comportent des systèmes multipistes qui leur permettent la reproduction stéréophonique.*



D. Bouquignaud - TOP

### *Les systèmes multicanaux*

La stéréophonie est universellement employée en haute fidélité, même si elle comporte encore quelques farouches adversaires. La *tétraphonie* est une extension de la stéréophonie : au lieu de simuler simplement au moyen des signaux droit et gauche l'espace sonore en face de l'auditeur, on restitue également l'espace arrière; pour cela, deux canaux supplémentaires sont nécessaires. Il existe plusieurs solutions qu'il ne faut pas confondre avec les systèmes pseudo-tétraphoniques, où l'on se contente d'arranger différemment, au moyen de quatre haut-parleurs, les deux signaux stéréophoniques habituels.

#### Système à quatre canaux

On peut généraliser le principe de l'enregistrement stéréophonique sur bande magnétique en ajoutant deux têtes supplémentaires. Le magnétophone comporte donc quatre têtes qui enregistrent simultanément quatre pistes sur la même bande.

#### Système CD 4

Il utilise le principe de la gravure sur disque (45°/45°). Chaque flanc des sillons est modulé par un signal comprenant directement la somme de deux canaux d'une part, et leur différence modulant une porteuse à 30 kHz d'autre part. Pour donner de bons résultats, cette méthode nécessite une électronique de décodage compliquée ainsi qu'une cellule de lecture de bande passante élevée.

#### Système 424

Il nécessite deux voies d'enregistrement, tout comme le système précédent, et une électronique de codage et décodage. Au moyen d'additions pondérées et de déphasages entre les quatre signaux issus des quatre microphones disposés en carré, on peut reconstituer l'image sonore initiale.

Un inconvénient de tous ces systèmes est l'obligation d'utiliser quatre haut-parleurs. C'est une des raisons qui limitent leur commercialisation et qui laissent totalement inemployés — en ce qui concerne le grand public — des systèmes plus complexes comme l'ambiophonie (grand nombre de voies et donc de haut-parleurs).

Des nombreuses discussions sur l'efficacité des systèmes multicanaux, on retient l'importance de la notion longtemps négligée de relief sonore. Sans doute, après avoir simplement imité le champ sonore original par une reconstitution patiente et quelque peu extravagante dans sa complexité, parviendra-t-on dans ce domaine, grâce aux connaissances accumulées, à des solutions raisonnablement envahissantes. Il faudra peut-être attendre pour cela la découverte de procédés nouveaux, représentant par exemple un progrès analogue à celui de l'holographie sur la simple photographie.

## BIBLIOGRAPHIE


**Radiodiffusion**

DELORAINE, *Des Ondes et des Hommes*, Flammarion, 1974. - HUND, *Frequency Modulation*, Mc Graw Hill, New York. - LIBOIS, *Faisceaux hertziens et Systèmes de modulation*, Chiron, Paris, 1965. *Techniques de l'ingénieur*, électronique, vol. 4, Imprimerie strasbourgeoise, Strasbourg. - STRATTON, *Théorie de l'électromagnétisme*, Dunod, Paris, 1961.

**Enregistrement et reproduction des sons**

*Techniques de l'ingénieur*, électronique, vol. 3, Imprimerie strasbourgeoise, Strasbourg. - BERANEK, *Acoustic Measurements*, Chapman and Hall, London, 1950. - DARTEVELLE, *Hifi, guide pratique*, Éd. Radio, 1972. - GAYFORD, *Electroacoustics*, Butterworth and co LTD, 1970. - HENNION, *Microphones à électrets*, thèse 3e cycle, 1975, université Pierre-et-Marie-Curie. - LEHMANN, *Les transducteurs électro- et mécano-acoustiques*, coll. CNET, Éd. Chiron, Paris, 1963. - MATRAS, *Acoustique et Électro-acoustique* (2 tomes), Éd. Eyrolles, Paris, 1967. - MEE, *The Physics of Magnetic Recording*, North Holland, 1964. - TREMAINE, *Audiocyclopedia*, Howard W. Sams and co, 1973.

Chauvaud de Rochefort - Fotogram

▲ *Prise de vues dans un studio de télévision.*

# LA TÉLÉVISION

## *Le récepteur de télévision ou téléviseur*

Le récepteur de télévision est constitué essentiellement de deux parties : le tube destiné à reconstituer l'image, et l'électronique qui doit transformer les signaux électriques captés par l'antenne en des tensions envoyées l'une au tube cathodique, l'autre au haut-parleur pour le son. La *figure* 1 donne la constitution schématique d'un récepteur noir et blanc.

### *Le tube cathodique*

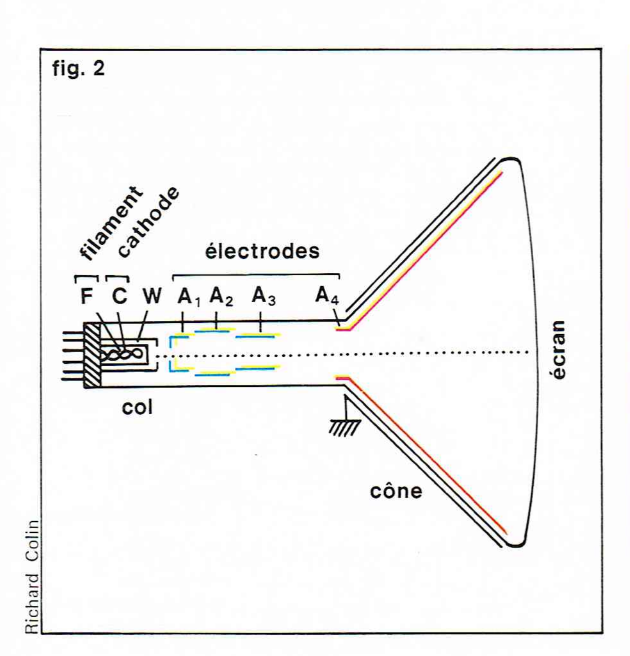
Examinons pour le moment le *tube-image* noir et blanc : il s'agit d'une ampoule de verre scellée dans laquelle on a fait un très bon vide. Un faisceau d'électrons très rapides vient frapper une couche luminescente et provoque une illumination plus ou moins grande suivant que les électrons sont plus ou moins nombreux à venir frapper un même point donné. L'ampoule de verre a une forme très caractéristique : elle est constituée d'un fond très légèrement bombé (l'*écran*) de forme rectangulaire, surmonté d'une partie conique raccordant à l'écran un court élément cylindrique que l'on nomme *col*.

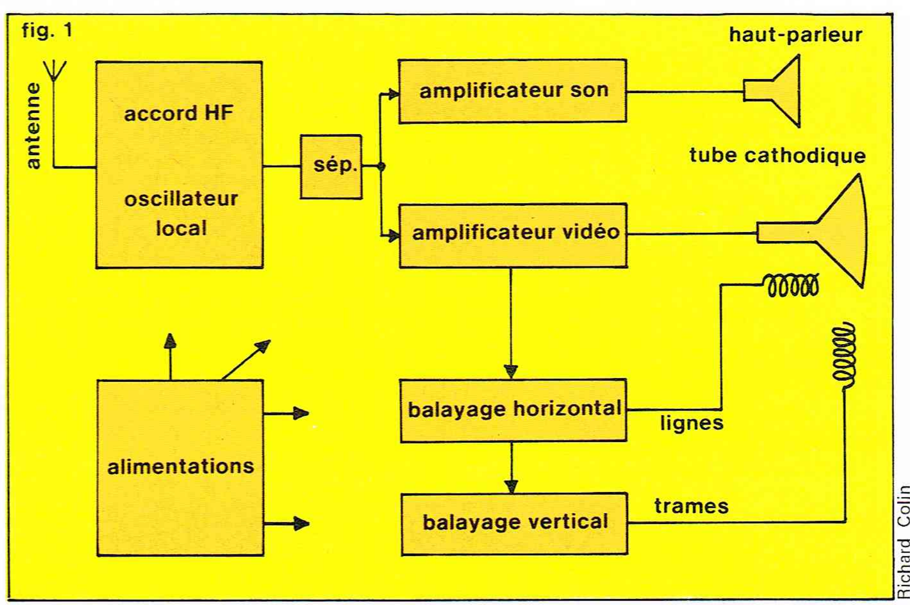
Le *cône* a eu pendant longtemps un angle d'ouverture de 90°, mais, dans le dessein de raccourcir le tube (et donc de diminuer son encombrement ainsi que celui du téléviseur, dont la profondeur dépend fortement de la longueur du tube), les constructeurs ont mis au point depuis 1955 un tube dit « 110° », qui a nécessité parallèlement des améliorations électroniques importantes. Il y a quelques années est même apparu un tube « 114° », donc encore moins long, et si l'on ne peut parler d'une réelle révolution technique, le fait qu'il s'agisse d'un tube couleur dénote de la part du constructeur une belle maîtrise technologique.

On est limité en valeur de l'angle d'ouverture du cône par la qualité de la déviation du faisceau électronique devant effectuer le balayage. La symétrie du faisceau est cylindrique alors que l'image est rectangulaire, ce qui pose des problèmes dans les coins de l'écran ; l'obtention d'une image non déformée nécessite des corrections de déviation du faisceau importantes et délicates.

La *figure* 2 montre le tube cathodique. Les électrons du faisceau sont produits par effet thermo-ionique : un filament chauffe la cathode constituée d'un cylindre de nickel dont une extrémité est fermée et qui est enduit d'une pâte de baryum et de strontium à grand pouvoir thermo-émissif. C'est cet élément qui produit les électrons. Autour de la cathode se trouve un second cylindre (W) dont l'extrémité plane est percée d'un trou ; ce trou, par où passent les électrons émis par la cathode, constitue le

▼ *Figure 1 : schéma synoptique d'un récepteur de télévision en noir et blanc.*
*Figure 2 : coupe schématique d'un tube cathodique utilisé pour la télévision.*



trou source de l'optique électronique qui suit et aussi contrôle le nombre des électrons qu'il laisse passer par la différence de potentiel qui lui est appliquée par rapport à la cathode. En allant vers l'écran, suivent plusieurs électrodes ($A_1$, $A_2$, $A_3$,...) en forme de cylindres, destinées à focaliser le faisceau électronique sur l'écran ; elles jouent le rôle de lentilles électrostatiques et sont portées à des tensions croissantes de manière à accélérer les électrons tout en les focalisant. La dernière électrode ($A_4$) est portée à une très haute tension (THT) de 18 à 20 kV et fournit la postaccélération. L'extérieur du cône du tube est graphité et mis à la masse de manière à protéger l'utilisateur et à former avec la dernière anode de postaccélération un condensateur mis à profit pour filtrer la THT.

L'ensemble filament-cathode-wehnelt et anodes d'accélération constitue le *canon à électrons*. Ce terme illustre le fait que les électrons qui en sortent sont animés d'une très grande vitesse, ce qui est nécessaire pour produire au niveau de l'écran une illumination importante de la couche sensible ou luminophore. Cette couche est formée de poudres phosphorescentes qui donnent une lumière blanc jaunâtre et sont constituées de mélanges soigneusement tenus secrets par les fabricants de tubes. On sait tout de même qu'entrent dans leur composition des substances du genre sulfure de cadmium activé à l'argent ou du tungstate de cadmium.

Frappée par un nombre plus ou moins important d'électrons, la *couche luminescente* produit un nombre variable de photons, donnant l'impression d'une luminosité plus ou moins grande et reconstituant ainsi les parties différemment éclairées d'une image. Par-dessus cette couche qui doit être homogène et d'épaisseur égale sur toute la surface de l'écran, on dépose une très mince couche d'aluminium (tube aluminisé) qui a plusieurs rôles. Elle collecte les électrons qui viennent frapper l'écran, tout en étant suffisamment mince pour les laisser passer quand ils sortent du canon. Elle arrête en revanche les ions positifs résultant de l'ionisation des gaz résiduels dans le tube par les chocs avec les électrons de haute énergie. Enfin, la couche d'aluminium réfléchit vers l'extérieur la lumière produite par la couche sensible quand elle est frappée par les électrons, améliorant de la sorte la luminosité et le contraste de l'image.

## Le bloc de déviation

Le *bloc de déviation* ne fait pas strictement partie du tube, mais lui est étroitement associé, puisque c'est lui qui est chargé de produire le champ magnétique déviant les électrons à l'intérieur de l'ampoule. Pour reformer l'image de télévision sur l'écran, en effet, on fait décrire au point d'impact du faisceau électronique un ensemble de lignes (819 ou 625) situées les unes sous les autres, tout en commandant son intensité de manière à rendre les parties claires et sombres de l'image (*fig.* 3).

Pour assurer ce *balayage* en forme de lignes sur l'écran par le faisceau, sa déviation est produite par un champ magnétique agissant sur les électrons en mouvement. D'après la loi de Laplace, une charge électrique $q$ en mouvement, animée d'une vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique d'induction $\vec{B}$, subit une force $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ qui, suivant l'application du produit vectoriel, est perpendiculaire à sa vitesse. La structure du champ magnétique est telle qu'elle doit provoquer la déviation de manière que les lignes soient le plus droites possible et que le balayage soit fait à vitesse uniforme.

Pour remplir ces conditions, le bloc de déviation est constitué d'un ensemble de bobines et de noyaux de ferrite destinés à concentrer l'induction magnétique à l'entrée du cône du tube cathodique. Grossièrement, on peut dire que deux paires de bobines se chargent respectivement de la déviation horizontale et de la déviation verticale. En fait, les aberrations de cette optique électronique sont telles que, pour assurer un déplacement bien horizontal du spot, il est nécessaire d'agir aussi sur le déplacement vertical du faisceau. Cet ensemble est enfilé sur le col du tube et vient se caler contre le cône. En plus des bobines, il y a aussi des aimants destinés à apporter de petites corrections continues sur la position au repos du spot, par exemple un recentrement, ce qui se traduit par un cadrage de l'image. D'autres aimants interviennent pour une correction de la géométrie de l'image, en particulier pour corriger la déformation en coussin (*fig.* 4).

Nous avons donc maintenant un dispositif, tube plus bloc de déviation, qui nous permet d'obtenir sur un écran un ensemble de lignes constituant une trame sur la hauteur de l'écran, en nous donnant la possibilité de rendre plus ou moins brillant le point lumineux qui décrit ces lignes. Le spot sera plus ou moins intense suivant la valeur de la différence de potentiel appliquée entre cathode et wehnelt. C'est en fait cette tension électrique, appelée *signal vidéo,* qui transporte l'information de plus ou moins grande luminosité des différents points de l'image.

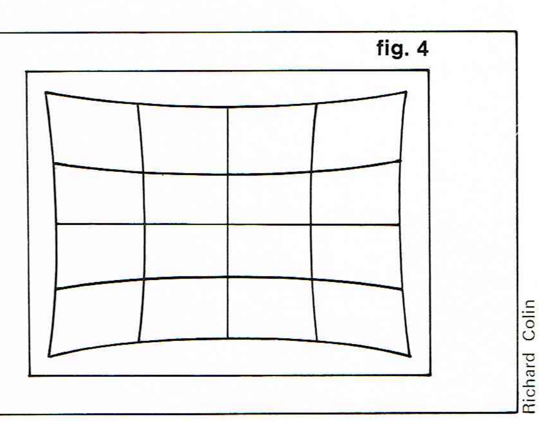
## Les signaux constituant le message de télévision

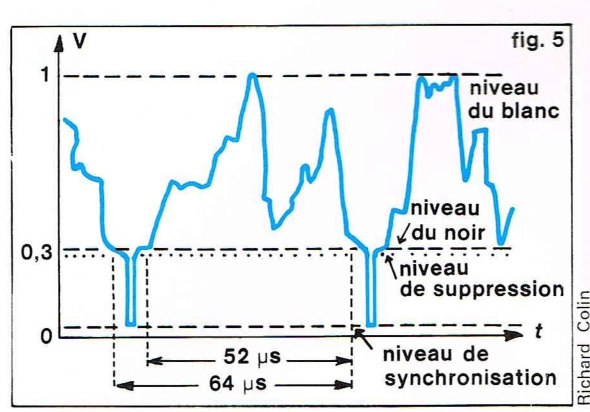
Bien entendu, pour reconstituer cette image, il faudra que les informations de luminosité dans le signal vidéo soient bien replacées par rapport aux débuts de lignes et aux débuts de trames, car, à la fabrication de l'image dans la caméra de télévision, on utilise un balayage identique pour analyser l'image observée et donner de tout point de chaque ligne de chaque image une tension dont l'amplitude est proportionnelle à sa luminosité. Il faut donc que la restitution ou la recomposition de l'image soit synchronisée avec l'analyse qui a été faite dans la caméra. On utilise pour ce faire des *signaux de synchronisation lignes et trames* chargés d'indiquer à quels moments le faisceau doit recommencer un balayage de ligne ou de trame. Ces signaux sont absolument indispensables pour la reconstitution de l'image, de manière tout à fait identique à celle qui a été analysée par la caméra.

Quand on aura ajouté au signal vidéo les signaux de synchronisation et un signal porteur de l'information sonore, on aura obtenu un ensemble complet de messages transmis par la télévision. Tous ces signaux sont envoyés simultanément par l'émetteur et captés par l'antenne qui est sur le toit de chaque maison, ou de l'immeuble avec une distribution collective par l'intermédiaire d'un amplificateur. Nous verrons un peu plus tard comment est formé le spectre de l'émission de télévision ; disons simplement, pour le moment, que les signaux de synchronisation sont superposés au signal vidéo, comme il apparaît sur la *figure* 5, et que le son module une porteuse dont la fréquence est voisine de celle du signal vidéo V ($t$).

***▼ Figure 3 :** principe du balayage entrelacé sur l'écran. Les lignes paires sont tracées en rouge et les lignes impaires en vert. En bleu sont figurés les retours de trames. Pour la clarté du dessin on n'a pas tracé toutes les lignes (625) du balayage. **Figure 4 :** distorsion de l'image en coussin. **Figure 5 :** signal vidéo composite en modulation positive.*

fig. 3



## *L'électronique du récepteur*

L'électronique associée au tube cathodique a pour buts principaux :

— de dégager du signal reçu par l'antenne et d'amplifier le signal vidéo composite, pour l'appliquer à la cathode ou au wehnelt ;

— de dégager et d'amplifier le signal son pour l'envoyer sur le haut-parleur ;

— de générer les signaux de balayage ligne et image en synchronisant les générateurs sur les tops du signal vidéo composite ;

— de produire les différentes tensions d'alimentation nécessaires au fonctionnement du tube image pour l'optique électronique et l'accélération, ainsi que pour l'ensemble des autres circuits électroniques dont les fonctions viennent d'être citées.

Le sélecteur VHF « Very High Frequencies » permet d'accorder les circuits haute fréquence d'entrée sur la fréquence du canal d'émission que l'on veut recevoir. Ce sont habituellement les émissions de la première chaîne (TF 1) qui sont émises en VHF (du moins en France). Cet accord est réalisé en substituant les unes aux autres des bobines et des circuits accordés par blocs.

On utilisait, il n'y a pas si longtemps, des ensembles de barrettes de Bakélite sur lesquelles étaient fixés les composants à changer ; ces barrettes portaient des contacts sur un de leurs grands côtés et étaient fixées dans un rotacteur dont la position angulaire permettait de choisir le canal sur lequel on souhaitait accorder le récepteur. La technique actuelle a remplacé le rotacteur par un clavier mécanique ou même par un clavier électronique faisant commuter des relais. Le matériel le plus moderne propose à l'utilisateur un clavier à touches électroniques ou sensitives, sans aucune partie mécanique, puisque le doigt posé sur la touche suffit, par le très faible courant qu'il laisse passer, à provoquer la commutation.

Suivant le procédé superhétérodyne, le signal VHF, de fréquence $f_1$, capté par l'antenne, est amplifié par un amplificateur accordé (premier rôle du sélecteur), puis mélangé à un signal produit localement. Ce signal local est fourni par un oscillateur dont la fréquence $f_2$ d'accord est également réglée par le sélecteur. Il résulte du mélange de ces deux signaux une tension de fréquence plus faible $f_3$ que l'on s'arrange pour garder toujours identique, précisément en modifiant la fréquence locale ($f_3 = f_1 - f_2$). Ainsi, quel que soit le canal capté, on peut, à partir de ce moment, utiliser un amplificateur accordé sur la fréquence $f_3$ pour donner au signal une amplitude suffisante, avant de continuer à le traiter pour en sortir les informations. Comme cet amplificateur travaille toujours à la même fréquence, dite « fréquence intermédiaire » ($F_i = f_3$), il est relativement facile de lui donner de très bonnes performances. Il y a en fait deux amplificateurs à fréquence intermédiaire $F_i$, car, juste avant, on sépare l'onde transportant le signal vidéo de l'onde transportant le signal son. Cette séparation est rendue possible par le fait que les fréquences porteuses de chaque signal sont suffisamment différentes pour n'exciter chacune que le circuit accordé qui lui convient et n'apporter aucune tension mélangée à l'autre voie d'amplification $F_i$.

Après que l'amplificateur $F_i$ son a donné au message sonore une amplitude suffisante, il est démodulé (détecté) et envoyé à un amplificateur audiofréquence chargé d'attaquer le haut-parleur. Dans le système français de télévision, le signal sonore module la porteuse en amplitude.

De la même manière, le signal vidéo composite traverse l'amplificateur $F_i$ vision, puis est démodulé avant d'attaquer l'amplificateur vidéo, qui doit lui donner une amplitude suffisante pour commander efficacement la cathode ou le wehnelt du tube cathodique. Il faut en effet une tension de l'ordre d'une centaine de volts pour assurer à l'image un contraste satisfaisant. Le bouton « contraste » du téléviseur agit sur le coefficient d'amplification vidéo qui envoie à la cathode une tension plus ou moins grande.

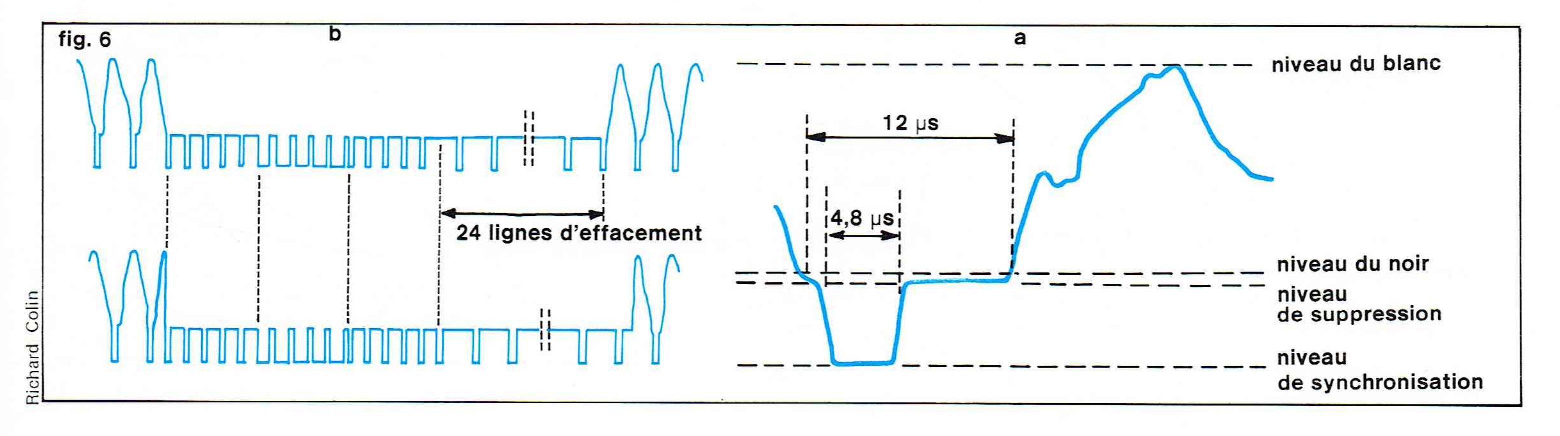
A ce niveau, les tops de synchronisation du signal vidéo composite sont appliqués à l'entrée d'un circuit chargé de séparer les tops étroits de synchronisation du balayage image. La *figure* 6 montre la configuration des signaux de synchronisation. Sur la *figure* 6a, on voit celui qui sert à synchroniser le départ de la ligne en 625 lignes ; la *figure* 6b représente l'ensemble des impulsions qui permettent de synchroniser les demi-images ou trames suivant qu'il s'agit de la trame des lignes paires ou impaires. On y voit en fait que la synchronisation des trames utilise 5 impulsions de 27,5 µs, précédées de 5 impulsions de préégalisation ayant 2,4 µs de largeur, et suivies de 5 impulsions de postégalisation de même largeur. On remarque en plus que 24 lignes sont effacées à chaque retour de trame dans le dessein d'éviter de reprendre un balayage avant que l'oscillateur concerné soit bien resynchronisé. En effet, après séparation, les signaux de synchro sont amenés jusqu'aux oscillateurs de lignes et de trames.

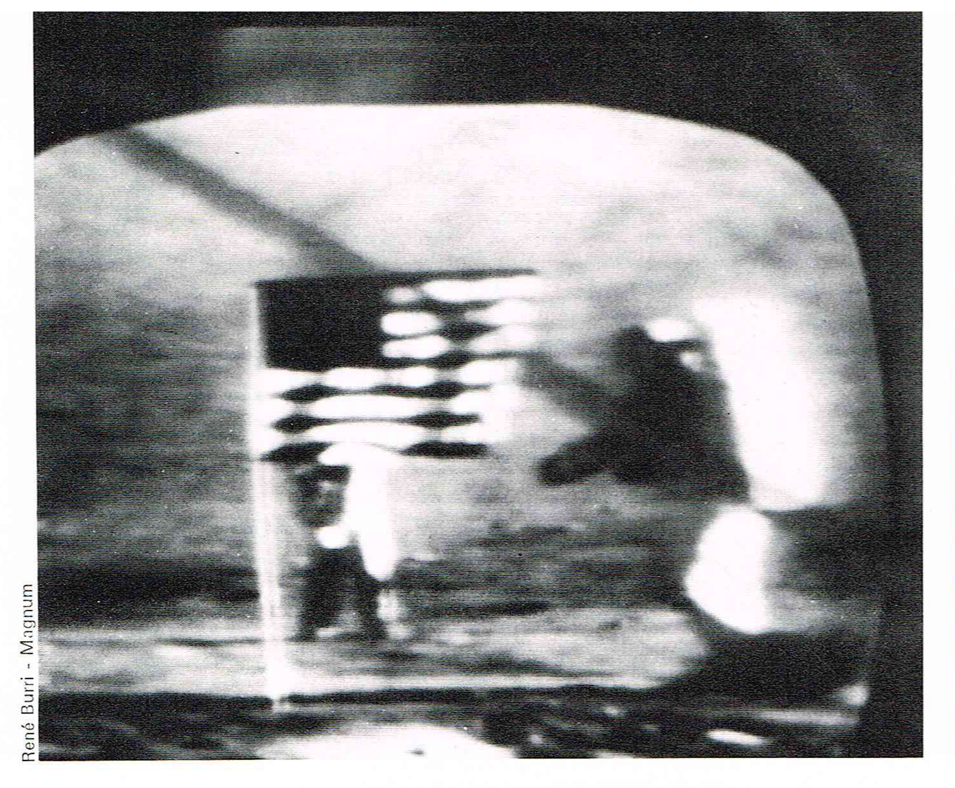
Dans tous les standards européens, la fréquence du balayage image est telle que l'on ait 25 images par seconde. Ce choix tient compte de ce que la persistance des impressions rétiniennes impose une fréquence de répétition minimale de 15 images par seconde environ suivant la valeur de l'éclairement moyen de l'image. Il tient compte aussi du fait que le secteur fournit une référence commode par sa fréquence à 50 Hz.

En fait, chaque image est composée par moitié, si bien que la fréquence pour chaque demi-image ou trame est de 50 Hz. La première trame est composée, sur toute la hauteur de l'écran, des lignes paires. La seconde trame est décalée par le signal de synchronisation trame, comme on peut le voir sur la *figure* 6, d'une demi-ligne, si bien que le balayage exécute les lignes impaires en commençant au milieu de la ligne du haut. Cela peut également se voir sur la *figure* 3. On dit que le balayage est entrelacé.

Bien entendu, à l'émission ou à la fabrication de l'image, on tient compte de cela pour composer le signal vidéo qui doit représenter successivement les lignes paires de l'image et, pour la seconde trame, les lignes impaires, et ainsi de suite. L'oscillateur de balayage image oscille donc à 50 Hz et délivre une forme d'onde voisine d'une dent de scie appliquée, après amplification, aux bobines de déviation verticale. Le balayage de lignes est plus rapide, puisque les deux standards français actuels nécessitent 819 et 625 lignes pour composer une image. On en utilise en fait un peu moins, comme nous l'avons vu précédemment, car on perd des lignes pendant la synchronisation des trames (24 lignes perdues en 625 et 41 en 819 lignes). Cela est peu important et ne change rien au principe de fonctionnement. Compte tenu des données précédentes : 25 images par seconde et 819 ou 625 lignes par image, la fréquence de l'oscillateur ligne doit donc être fixée à 20 475 Hz (25 × 819) et 15 625 Hz (25 × 625).

▼ *Figure 6 : configuration des signaux de synchronisation ; a, impulsion de synchronisation des lignes en 625 lignes ; b, signaux de synchronisation des trames en 625 lignes pour les lignes paires et impaires. Ils sont composés de 5 impulsions de 27,5 µs, précédées de 5 impulsions de préégalisation de 2,4 µs et suivies de 5 impulsions de postégalisation (b, d'après R. Besson,* Cours de télévision moderne, *Éditions Radio).*





René Burri - Magnum



Paolo Koch - Rapho

*▲ A gauche, un des grands moments de la télévision, la retransmission des premiers pas de l'homme sur la Lune (20 juillet 1969). A droite, prise de vues en studio.*

## Formation des images

A l'autre bout de la chaîne de la télévision, on se trouve à l'origine des signaux vidéo et son. Les images sont obtenues avec des caméras possédant une optique traditionnelle (au moins en noir et blanc), c'est-à-dire un objectif qui permet de concentrer la scène à transmettre sur une surface sensible. A la différence des appareils photographiques ou des caméras de cinéma, la surface sensible n'est pas un film qui sera par la suite envoyé au développement, mais une couche d'un matériau photo-émissif ou photoconducteur; on analyse séquentiellement par un balayage l'état de sa charge électrique. La surface sensible et le système d'analyse sont enfermés dans le tube analyseur qui est, comme le tube cathodique, un tube à vide.

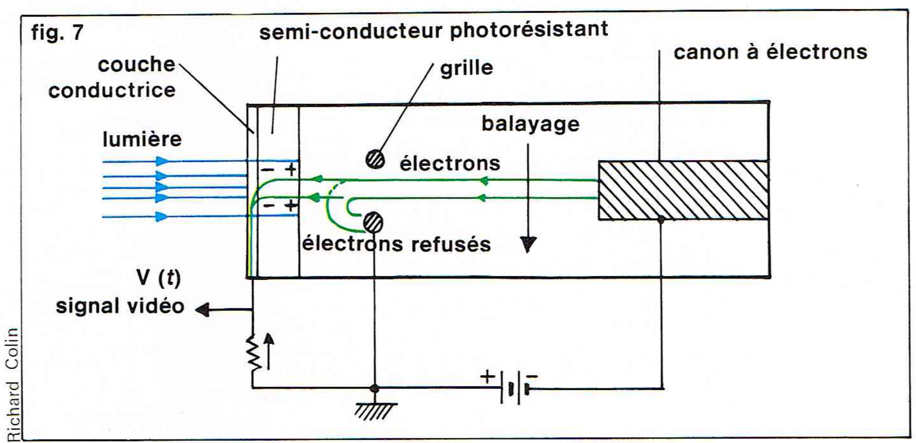
### Le tube de prise de vues

Il existe plusieurs sortes de tubes analyseurs dont les principaux sont l' « image-orthicon », le « vidicon » et le « plumbicon ». On trouve dans les notices des fabricants d'autres noms pour désigner des tubes analyseurs; ce sont en fait des versions un peu différentes, ou légèrement améliorées, ou destinées à des applications particulières, du même vidicon. Dans ces multiples versions, le vidicon est le tube analyseur qui est le plus employé à l'heure actuelle. Le plumbicon, qui est dans son principe identique au vidicon, est un dispositif à hautes performances généralement réservé aux équipements professionnels de la télévision en couleurs.

### Le vidicon

La *figure* 7 donne le principe de fonctionnement de ce tube très répandu. La surface sensible est composée d'une couche photoconductrice dans laquelle la lumière incidente vient créer des paires électrons-trous qui sont séparées par un champ électrique appliqué à la couche.

*▼ Figure 7 : principe de fonctionnement du tube analyseur vidicon.*




Richard Colin

Un faisceau d'électrons balaye la surface arrière de la couche et la frappe aux endroits où la lumière a provoqué une annulation de la charge négative. Une couche conductrice transparente déposée à l'avant de la couche photoconductrice collecte ce courant électronique et représente ainsi les variations d'éclairement de la surface sensible. En tous les endroits de la couche où la lumière n'est pas venue influencer la répartition des charges, les électrons sont repoussés et collectés par une grille, ne donnant ainsi aucune contribution au signal vidéo.

Le faisceau d'électrons se déplace sur la surface à analyser suivant un balayage identique à celui qui a été décrit pour la restitution des images dans le tube du téléviseur. On peut dire que le balayage fournit les indications temporelles et le signal vidéo les indications de luminosité, toutes nécessaires pour la reconstitution de l'image. En fait, on ne va pas transmettre tout le signal de balayage mais seulement les instants particuliers de fin de ligne ou de fin de trame ; ce sont les signaux de synchronisation.

Les caméras de prise de vues de haute qualité, réservées, à cause de leur prix, aux stations de télévision nationales ou commerciales, sont équipées depuis une dizaine d'années de tubes de prise de vues très améliorés par rapport aux vidicons; ce sont les *plumbicons*. Leur constitution est à peu près la même que celle des vidicons, mais l'emploi de nouveaux matériaux a permis d'améliorer la rapidité du tube, c'est-à-dire sa faculté de suivre les mouvements rapides du sujet tout en conservant une bonne définition; de plus, leur réponse est linéaire, comme pour l'image-orthicon, c'est-à-dire que l'amplitude du signal vidéo est proportionnelle à l'éclairement de la surface sensible, ce qui n'est pas le cas dans le vidicon et oblige à introduire une correction dite de gamma ($\gamma$).

Les caméras dont il est question ici sont la plupart du temps équipées pour la couleur avec trois tubes de très bonne qualité pour l'analyse des couleurs, bien qu'apparaissent actuellement sur le marché des caméras couleurs portables semi-professionnelles fonctionnant avec un seul tube vidicon.

## Bandes de fréquences occupées. Canal de télévision

A la sortie de la caméra de télévision, nous disposons donc du signal composite comprenant la composante vidéo et les tops de synchronisation. Avec le signal son, le signal composite doit être envoyé vers l'antenne pour pouvoir se propager et parvenir sur les récepteurs d'un maximum de téléspectateurs. L'ensemble des fréquences occupées par ces signaux ne permet pas une propagation à de grandes distances. C'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une modulation d'une onde ayant une fréquence suffisamment élevée et qui se propage bien pour véhiculer les informations de l'image de télévision. Il y a plusieurs types de modulations utilisés en télévision.



J. Tricot - Parimage

Dans le *standard européen,* le signal vidéo module la porteuse en amplitude. Mais ici, il est nécessaire de noter une difficulté à laquelle on se heurte, compte tenu des largeurs de bande qu'occupe le signal vidéo et qui sont liées à la définition de l'image. Nous avons déjà vu que l'image était constituée dans le sens vertical de lignes, ce qui impose la définition verticale qui ne peut, bien sûr, excéder dans le meilleur des cas le nombre de ces lignes. Dans le sens horizontal, par contre, la situation est différente, car le signal vidéo varie de manière continue le long d'une ligne, et on pourrait penser que sa définition est infinie. Il n'en est évidemment rien, et il faut tenir compte d'autres facteurs pour voir comment est limitée cette définition. On essaye en fait d'obtenir sur l'écran reconstituant l'image une définition équilibrée, c'est-à-dire une séparation des points identique dans le sens horizontal et dans le sens vertical. Cela conduit, le rapport de la hauteur à la largeur de l'image étant de 3/4, à une définition de 830 points par ligne en 625 lignes par exemple.

Poursuivons ce raisonnement en déterminant la bande de fréquences nécessaire pour transmettre le signal vidéo avec une telle précision. Cela s'obtient en écrivant que cette fréquence correspond à 830 transitions par ligne pour 625 lignes dans une image et pour 25 images par seconde, ce qui conduit à une fréquence de 6,5 MHz en tenant compte de ce qu'il y a deux transitions par période. Il s'agit là, bien sûr, d'un calcul fournissant une valeur maximale de bande passante. En pratique, on se limitera à une bande un tout petit peu inférieure, car on sait que l'image ne sera pratiquement jamais aussi fine et qu'elle est constituée de zones assez larges de teinte uniforme.

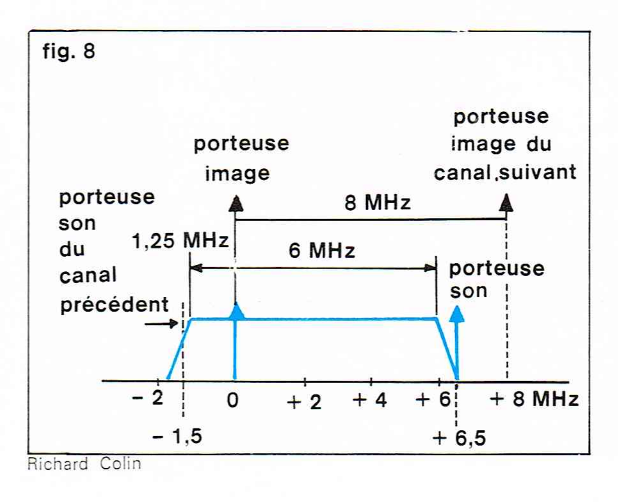
Sur la *figure* 8, on peut voir représenté un canal de télévision correspondant au *standard français à 625 lignes.* Les deux flèches verticales figurent les deux fréquences porteuses pour l'image et pour le son. Les modulations se font, comme il a été dit, en amplitude; elles sont séparées de 6,5 MHz. On ne conserve, pour l'image, qu'une bande latérale en tronquant l'autre de telle manière qu'elle soit réduite au cinquième de sa largeur initiale. Cette méthode conserve toute l'information tout en limitant la bande occupée sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à des procédés de modulation à bande latérale unique (BLU), qui ne vont pas sans entraîner quelques complications à la démodulation. La modulation son est, elle, transmise intégralement avec une largeur de bande importante, nettement supérieure aux 4,5 kHz de la radio, car la bande audiofréquence représente une très faible proportion de la bande totale occupée.

En *819 lignes du standard français,* chaque canal de télévision occupe une bande de fréquences bien plus large, soit 13,15 MHz. De telles caractéristiques de fonctionnement conduisent à des performances très bonnes, et on a longtemps dit que la télévision française était techniquement la meilleure du monde. Malheureusement, une grande largeur de bande provoque un encombrement des gammes de fréquences disponibles pour la transmission des émissions de télévision tel que l'on a dû, dans un premier temps, trouver des astuces, par exemple les canaux inversés (la porteuse son avait une fréquence inférieure à celle de la porteuse image). Par la suite, les différents pays se sont mis d'accord pour définir les bandes réservées aux émissions de télévision et préciser les différents standards mondiaux. C'était à la Conférence européenne de radiodiffusion qui s'est réunie à Stockholm en 1961. On trouvera sur le *tableau* I les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision. Les bandes de fréquences se répartissent de la façon suivante :

- les bandes VHF I et III s'étendent respectivement de 41 à 68 MHz pour la bande I et de 163 à 216 MHz pour la bande III;
- les bandes UHF IV et V vont de 470 à 582 et de 582 à 960 MHz;
- la bande II, de 87,5 à 100 MHz, est réservée aux émissions de radio en modulation de fréquence.

Avant de considérer l'émission des signaux et leur propagation, il faut noter qu'il existe deux types de modulation image : la modulation positive et la modulation négative. Dans la modulation positive, les maximums du signal vidéo composite correspondent aux blancs de l'image et au maximum de puissance émise; ce cas est celui du dessin

◀ ***A gauche, le relais de télévision de Créteil.***




Richard Colin

◀ ***Figure 8 : canal de télévision correspondant au standard français à 625 lignes (bande de fréquences occupée).***

**Tableau I**
**Les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision**

| Repère U.E.R. | A | | | B | C | D | E | F | G | H | I | K | L |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Système | Anglais | Américain (F.C.C.) | | Européen Gerber | Belge | O.I.R.T. | Français | Belge | Gerber | Gerber | Anglais | O.I.R.T. Européen | Français |
| Nombre de lignes | 405 | 525 | 625 | 625 | 625 | 625 | 819 | 819 | 625 | 625 | 625 | 625 | 625 |
| Affectation | VHF | VHF/UHF | VHF/UHF | VHF | VHF | VHF | VHF | VHF | UHF | UHF | UHF | UHF | UHF |
| Largeur canal (en MHz) | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 13,15 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Bande vidéo (en MHz) | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 10,4 | 5 | 5 | 5 | 5,5 | 6 | 6 |
| Écart porteuses (en MHz) | 3,5 | 4,5 | 4,5 | 5,5 | 5,5 | 6,5 | 11,15 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 6,5 |
| Sens du canal | V > S | V < S | V < S | V < S | V < S | V < S | V > S<br>V < S | V < S | V < S | V < S | V < S | V < S | V < S |
| Bande résiduelle (en MHz) | 0,75 | | | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 2 | 0,75 | 0,75 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 |
| Nombre de canaux VHF | 13 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | | | | | |
| Nombre de canaux UHF | | 70 | 70 | | | | | | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| Fréquence trame (en Hz) | 50 | 60 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Fréquence ligne (en Hz) | 10 125 | 15 750 | 15 625 | 15 625 | 15 625 | 15 625 | 20 475 | 20 475 | 15 625 | 15 625 | 15 625 | 15 625 | 15 625 |
| Modulation image | + | — | — | — | + | — | + | + | — | — | — | — | + |
| Modulation son | AM | FM | FM | FM | AM | FM | AM | AM | FM | FM | FM | FM | AM |

*Nota :* F.C.C. = Federal Communication Commission.
Gerber = Normes allemandes définies par le Docteur Gerber et adoptées par plusieurs pays.
O.I.R.T. = Office International de Radio et de Télévision, groupant les pays de l'Est.
U.E.R. = Union Européenne de Radiodiffusion.

▲ *Tableau I : les différents standards mondiaux de transmission des images de télévision (d'après R. Besson,* Théorie pratique des téléviseurs à transistors, *Éditions Radio).*

de la *figure* 5. Dans la modulation négative, l'allure du signal vidéo composite est inversée, c'est-à-dire que le maximum de l'amplitude est atteint pour les fonds des tops de synchronisation et l'amplitude minimale pour les blancs de l'image. Cela apparaît, dans le *tableau* I des différents standards mondiaux, sur la ligne « Modulation image », par un signe + pour la modulation positive et par un signe — pour la modulation négative. On voit également apparaître sur ce tableau les différences entre les divers systèmes de télévision ; outre les normes vidéo qui viennent d'être décrites, les normes RF diffèrent en ce qui concerne l'écartement des porteuses image et son, le type de modulation du son, la bande résiduelle, l'écart entre les porteuses, leur position respective... Tout cela est, bien entendu, défini pour le noir et blanc ; nous verrons que, pour la couleur, l'existence de trois procédés différents ajoute à la confusion.

Les grandes largeurs de bande utilisées pour la transmission des images de télévision conduisent à employer des porteuses à des fréquences elles-mêmes très élevées. Elles sont caractérisées par une propagation d'autant plus rectiligne que leur fréquence est plus élevée. Il est donc nécessaire, si l'on veut atteindre des antennes de réception dans un périmètre étendu, de placer des antennes d'émission le plus haut possible et d'étudier leur implantation en fonction des obstacles naturels ou artificiels que les signaux pourraient rencontrer au cours de leur propagation. Une colline ou des immeubles créent des zones d'ombre dans lesquelles il est difficile de capter convenablement les ondes. C'est aussi la raison pour laquelle les antennes de réception sont souvent placées sur les toits, et il est quelquefois nécessaire de placer des réémetteurs de faible puissance pour fournir le signal à un groupe d'habitations isolées.

▼ *Les relais de télévision installés près de Grenoble pour la retransmission des Jeux olympiques d'hiver (hiver 1968).*



Archives Snark - R. Bouillot - Thomson - CSF



## *Principes de compatibilité pour la télévision en couleurs*

La télévision en noir et blanc est, bien sûr, antérieure à la télévision en couleurs, mais ce n'est pas l'unique raison qui nous a fait détailler son fonctionnement avant d'aborder celui de la télévision en couleurs. C'est aussi parce que les principes de fonctionnement sont les mêmes et que le principe de compatibilité impose d'une part que les images émises en couleurs puissent être reçues sur un poste « noir et blanc », et d'autre part que les émissions en noir et blanc puissent être reçues sur un poste « couleurs ». Il ne pouvait être question évidemment de recréer, parallèlement à l'infrastructure de la production des images et de leur émission en noir et blanc, une autre infrastructure pour la couleur, pas plus d'ailleurs qu'il n'était possible de ne s'adresser, au début de l'utilisation de cette technique, qu'aux quelques privilégiés, en nombre forcément limité, qui pourraient acquérir un récepteur trois à cinq fois plus cher qu'un récepteur « noir et blanc ».

La double compatibilité, énoncée pour la première fois par Georges Valensi, a donc autorisé un développement harmonieux de la télévision en couleurs à côté du noir et blanc, les émissions en couleurs remplaçant peu à peu celles en noir et blanc, après, naturellement, que l'on eut équipé quelques émetteurs pour la couleur, dans les régions à plus forte densité de population, et que les téléspectateurs eurent commencé à changer leurs récepteurs, sans pour autant se priver des émissions en noir et blanc qui continuaient à être les plus nombreuses.

Une autre contrainte importante qu'ont rencontrée les ingénieurs qui ont mis au point la transmission des images

colorées consistait en une limitation absolue de la bande des fréquences accordée aux émissions de télévision. La grande largeur des canaux limite déjà très fortement leur nombre en noir et blanc, et il n'était absolument pas question d'accorder des standards plus larges pour la couleur. Cela signifiait que la télévision en couleurs devait être d'abord une télévision en noir et blanc, à laquelle il fallait ajouter une information de couleur — sans pour autant que sa transmission occupe dans le spectre des fréquences radio-électriques une place plus grande.

## Bases de la télévision en couleurs. Trichromie

Newton (1642-1727) est le premier à avoir réalisé une étude expérimentale ayant des bases physiques sérieuses sur la composition de la lumière et de la couleur. L'expérience fondamentale consistait à faire passer un fin pinceau de lumière blanche à travers un prisme de verre : de l'autre côté, la lumière ressort en un éventail dont les différents rayons sont colorés par variation continue. Newton fut ainsi amené à formuler le principe essentiel de la colorimétrie, à savoir que la lumière blanche résulte de la superposition de lumières élémentaires ayant chacune une couleur pure.

Mais c'est Huygens (1629-1695) qui fournit l'explication de ce phénomène en considérant l'aspect ondulatoire de la lumière. D'après Huygens, les différentes couleurs sont dues aux différences de longueurs d'onde des composantes élémentaires de la lumière. De la sorte, la lumière n'est qu'une petite partie de l'ensemble des radiations électromagnétiques. Son spectre s'étend approximativement de 700 nm pour la lumière rouge à 400 nm pour la lumière violette en passant par toutes les teintes intermédiaires : bleu, vert, jaune, orange.

C'est parce que la lumière a une vitesse différente suivant sa longueur d'onde, plus grande pour la longueur d'onde la plus grande, dans un milieu tel que le verre (où sa vitesse est de toute manière inférieure à ce qu'elle est dans le vide), qu'elle est déviée différemment suivant sa longueur d'onde en traversant le prisme. La lumière violette est donc plus déviée à l'intérieur du verre que la lumière rouge, ce qui produit cet étalement du pinceau de départ en un éventail. (Voir le chapitre *Optique,* p. 207.)

## Mélange des couleurs - Couleurs complémentaires

La nature physique de la lumière est à la base de la sensation de couleur, et chaque longueur d'onde est perçue par l'œil comme une certaine teinte ou nuance. Toutes ces nuances sont présentes dans la lumière blanche, disons la lumière du Soleil ; nous verrons plus tard qu'il est possible de reconstituer plus simplement une lumière qui paraîtra blanche. C'est la raison pour laquelle, à la sortie du prisme, dans l'expérience de Newton, la teinte de la lumière change de manière continue sans que l'on puisse mettre une limite bien tranchée entre les nuances. On reconnaît cependant, en les distinguant bien, des nuances particulières que l'on appelle *couleurs spectrales ;* elles sont perçues par l'œil comme les couleurs les plus pures, les plus brillantes, les plus *saturées.* Entre ces couleurs spectrales, on passe progressivement d'une teinte à l'autre.

Que se passe-t-il quand on mélange deux ou plusieurs teintes pures ensemble ? C'est une expérience que tout le monde a faite à l'âge où on manipule habituellement des crayons de couleur ou des peintures, et cela a été l'occasion de se rendre compte que l'on peut ainsi produire d'autres teintes que celles de départ. Elles ne sont pas aussi intenses que celles qui ont permis de les composer, mais, en choisissant bien les composantes initiales, il est possible de retrouver toutes les teintes.

Considérons maintenant la sensation de couleur que nous pouvons avoir en regardant les différents objets autour de nous : par exemple deux poivrons, vert et rouge, du moins tant qu'ils sont éclairés en lumière blanche. Si, en effet, on les éclaire tous les deux, le vert et le rouge, avec une lumière d'une seule teinte spectrale verte, seul le poivron vert conservera sa couleur, l'autre paraîtra très sombre, presque noir. Cela s'explique par le fait que les objets colorés recevant la lumière blanche du Soleil filtrent certaines longueurs d'onde, c'est-à-dire qu'ils ne réfléchissent pas de la même façon toutes les longueurs d'onde ; ainsi, le poivron rouge réfléchit bien la composante de lumière rouge mais absorbe les longueurs d'onde correspondant aux couleurs violet, bleu, vert et orangé. Éclairé en lumière verte, le poivron rouge absorbe cette couleur et ne la réfléchit pas, si bien qu'il apparaît noir. Pour l'impression en couleurs ou pour la peinture, on procède à des mélanges de teintes en utilisant des substances qui possèdent les propriétés réfléchissantes requises. Les pigments jaunes absorbent le violet, le bleu, le vert, l'orangé et le rouge, et ne réfléchissent donc que le jaune. De même, le pigment bleu ne réfléchit que le bleu ; et si l'on mélange ces deux pigments jaune et bleu, le résultat devrait être le noir, puisque chacun des deux pigments absorbe la seule couleur que réfléchit l'autre. En fait, on obtient un vert sombre, car les pigments de départ réfléchissent une certaine bande de longueurs d'onde autour de la teinte qui leur donne leur couleur ; il y a donc un recouvrement des teintes réfléchies, dans notre exemple, qui correspond à la teinte verte, mais celle-ci sera très atténuée et paraîtra donc sombre.

Si l'on mélange ensemble plus de deux pigments, les chances de réflexion d'une bande donnée de longueurs d'onde deviennent très faibles, et, pour plus de trois constituants dans le mélange, on est pratiquement sûr d'obtenir du noir. Nous sommes dans le cas du *mélange* dit *soustractif* car chaque pigment incorporé au mélange enlève une partie du spectre des couleurs et ainsi soustrait des longueurs d'onde à la lumière réfléchie. La *figure* 9 montre le résultat d'un mélange soustractif en partant de trois couleurs bien réparties dans le spectre et dont nous reparlerons longuement : rouge, vert et bleu. Ces couleurs sont mélangées deux à deux, puis les trois dans la partie centrale du dessin qui paraît ainsi noire, montrant bien que chaque couleur de départ a soustrait une partie du spectre.

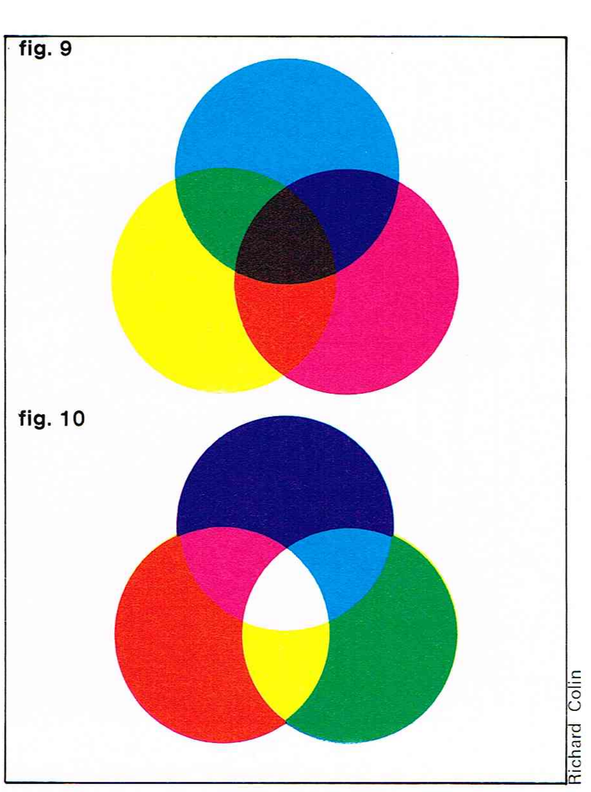
Il y a une autre manière de mélanger les couleurs que celle de l'imprimeur ; on peut procéder de la manière suivante : on projette sur un écran la lumière provenant d'une ou de plusieurs sources en s'arrangeant pour qu'elles se superposent. Ces lumières de couleurs différentes peuvent être obtenues en faisant passer une lumière blanche à travers un filtre arrêtant toutes les longueurs d'onde sauf une, ou une bande très étroite. La couleur perçue sur l'écran est imprévisible et ne s'explique pas comme dans le cas précédent en découpant des bandes dans le spectre des fréquences. Comment expliquer en effet la couleur pourpre qui résulte de l'addition de deux lumières, l'une rouge, l'autre violette ? Nous sommes dans le cas du *mélange* dit *additif.* La *figure* 10 montre le

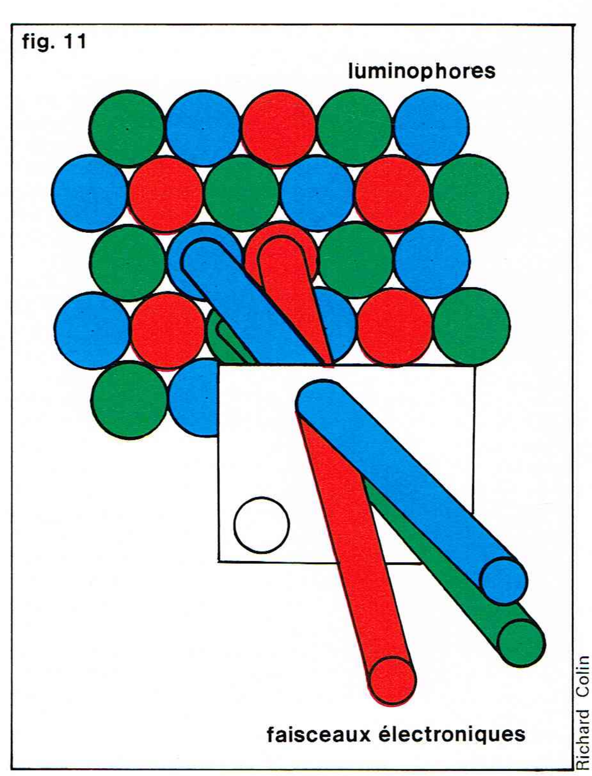
Léonard Freed - Magnum



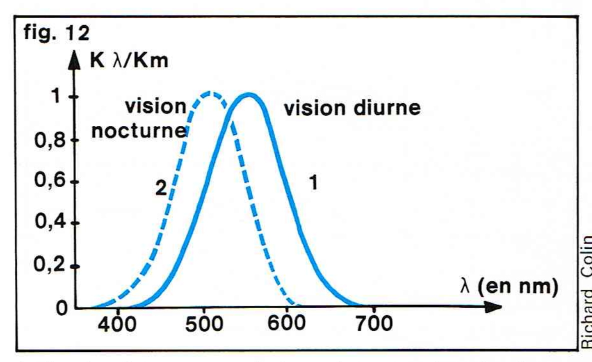
▲ ***Les collines ou les immeubles créent des zones d'ombre dans lesquelles il est difficile de capter convenablement les ondes de télévision ; c'est la raison pour laquelle il est souvent nécessaire de placer les antennes de réception sur les toits ou parfois sur les collines.***

▶ *Figure 9 : résultat d'un* **mélange soustractif** *de trois couleurs bien réparties dans le spectre (rouge, vert et bleu). Figure 10 : résultat d'un* **mélange additif** *de trois couleurs (rouge, vert et bleu). Figure 11 : trajet des faisceaux d'électrons dans un tube trichrome; les trois faisceaux de rayons (rouge, vert et bleu), passent à travers un trou du masque et atteignent les luminophores correspondants; ceux-ci sont de diamètre inférieur à celui du faisceau pour éviter le chevauchement des faisceaux (voir texte page 179).*




▶ *Figure 12 : courbes des sensibilités relatives pour l'observateur moyen conventionnel; la courbe 1 correspond à la vision diurne et la courbe 2 à la vision nocturne.*




résultat du mélange additif des trois mêmes couleurs que précédemment : rouge, vert et bleu. On voit qu'en mélangeant une lumière verte et une lumière rouge on a une impression de jaune, le mélange des lumières verte et bleue donne le cyan, et les lumières rouge et bleue donnent le magenta que l'on a appelé jusqu'ici « pourpre » (autre nom pour désigner la même chose). Enfin, ce qui montre bien la grande différence avec le mélange soustractif, l'addition des trois lumières au centre de la figure donne une impression de blanc. Cela est tout à fait conforme à l'expérience de Newton, qui montrait que la lumière blanche est composée de toutes les longueurs d'onde, et l'on vient de voir que l'impression de blanc peut être donnée par l'addition de trois lumières bien réparties dans le spectre.

En poussant plus loin encore les recherches sur la couleur, de nombreuses expériences ont montré qu'il est possible de donner la sensation de blanc en superposant seulement deux lumières; mais il faut choisir très soigneusement ces deux couleurs spécifiques : il faut que leurs intensités soient dans un rapport bien déterminé. On peut même montrer qu'il est possible d'arriver au résultat avec une infinité de ces paires; on appelle de tels couples des **couleurs complémentaires.** Cependant, la finesse d'ajustement des teintes que l'on obtient en utilisant trois couleurs de base et en les mélangeant dans différentes proportions est si bonne que c'est le procédé le plus employé pour la restitution des couleurs, aussi bien par mélange soustractif dans l'imprimerie ou la photographie que par mélange additif dans la télévision en couleurs. La technique des peintres impressionnistes était également fondée sur le mélange additif, au contraire de la technique habituelle de la peinture qui consiste à faire un mélange soustractif des pigments. Les impressionnistes juxtaposaient directement sur leur toile de petites taches de couleurs différentes. A une distance suffisante, on ne distingue plus ces taches les unes des autres, et l'œil intègre directement pour avoir une sensation colorée globale.

Dans le tube trichrome de télévision en couleurs, la sensation colorée est obtenue de la même manière en mélangeant des points des trois couleurs primaires avec des intensités différentes suivant la couleur que l'on veut obtenir. Sur la *figure* 11, on voit comment sont arrangées les pastilles des trois phosphores qui, excités par les faisceaux électroniques, produisent l'émission de trois lumières colorées rouge, verte et bleue. En commandant l'intensité des faisceaux d'électrons sur chaque pastille de luminophore, on peut doser la proportion de chaque composante de lumière colorée, et ainsi commander la teinte et la luminosité émises par l'écran. Comme il y a plusieurs types d'écrans utilisés dans les récepteurs de télévision en couleurs, nous en ferons une description détaillée plus loin. Avant d'aborder les réalisations des téléviseurs, il nous reste à préciser suivant quelles règles les mélanges de couleurs sont faits.

## *Grandeurs caractérisant une couleur*

A l'inverse, pour déterminer la composition spectrale d'une lumière complexe, ce qui donne sa couleur, on utilise un instrument appelé *spectrophotomètre.* Ces mesures physiques conduisent à un résultat qui fait correspondre à chaque raie, pour un spectre discontinu par exemple, donc pour chaque longueur d'onde $\lambda$ présente dans le spectre, une partie correspondante $\Delta P$ de la puissance totale P transportée par cette lumière. Si le spectre est continu, on évalue la puissance dP transportée sous forme de radiations entre les longueurs d'onde $\lambda$ et $\lambda + d\lambda$, $d\lambda$ étant un infiniment petit. Le rapport $dP/d\lambda = P_\lambda$ est la densité de flux d'énergie monochromatique. Cela conduit à la construction d'une courbe donnant la répartition spectrale d'énergie de la lumière où les longueurs d'onde $\lambda$ sont en abscisses et la densité de flux $P_\lambda$ en ordonnées. Si la lumière est dans le visible, on considère son flux lumineux F qui s'évalue en *lumens.*

L'*efficacité lumineuse* K est le rapport de ces deux grandeurs, soit $K = F/P$. L'efficacité lumineuse varie en fonction de la longueur d'onde pour les lumières monochromatiques, comme l'indique la *figure* 12. Cette courbe, qui fait référence à la sensibilité de l'œil, n'a pu être

obtenue qu'à partir d'un grand nombre de mesures effectuées sur beaucoup d'observateurs et en établissant une réponse moyenne ; c'est pourquoi on la rapporte communément à l'observateur moyen conventionnel tel qu'il a été défini par la Commission internationale de l'éclairage. Sur cette figure, les ordonnées sont les valeurs du rapport $K/K_m$ où $K_m$ est la valeur maximale de l'efficacité lumineuse égale à 680 lm/W pour $\lambda = 555$ nm, valeur donnée expérimentalement. L'une des deux courbes de la *figure* 12, relative aux forts éclairements, est dite de « sensibilité photopique », l'autre pour les éclairements faibles, est dite de « sensibilité scotopique ». La courbe 2 pour les éclairements crépusculaires ressemble beaucoup à la courbe 1, mais est décalée vers les faibles longueurs d'onde. La courbe 1 montre que l'œil est très peu sensible dans le rouge et le bleu, et très sensible dans le jaune-vert.

Une lumière complexe constituée de l'addition de plusieurs composantes monochromatiques aura une efficacité déterminée par les proportions relatives de ses diverses composantes, chacune d'elles étant affectée d'un poids proportionnel à son efficacité propre. Comme nous l'avons vu pour le mélange additif de plusieurs lumières simples, la couleur résultante dépend de leurs longueurs d'onde, et à présent nous savons de quelle manière chaque lumière simple intervient dans le résultat par son efficacité. Il est d'ailleurs possible de donner une sensation de couleur identique en faisant des mélanges de compositions spectrales très différentes. Ainsi, on peut donner la sensation d'un même jaune soit par une lumière monochromatique de longueur d'onde voisine de 580 nm, soit en filtrant une lumière blanche pour lui retirer ses composantes spectrales bleues et rouges, ou bien encore en superposant des lumières rouges et vertes. Cela récapitule toutes les possibilités qu'il y a de donner une impression de couleur particulière ; nous les avions décrites en tant que décomposition de la lumière blanche, mélanges soustractif et additif.

Revenons aussi sur la notion de *lumière blanche* qui est restée imprécise pour le moment. On se rend compte effectivement dans la pratique qu'une sensation de lumière blanche est obtenue pour des compositions spectrales sensiblement différentes, et, comme on se réfère souvent à la lumière blanche, il est nécessaire de préciser ce que l'on met derrière ce terme. La Commission internationale de l'éclairage a défini trois sources A, B et C, que l'on peut utiliser comme références pour la lumière blanche suivant les applications colorimétriques particulières. L'étalon A est une lampe à filament de tungstène en atmosphère gazeuse dont la température de couleur est de 2 850 °K. (La température de couleur est la température du « corps noir » incandescent qui émet une lumière dont la composition spectrale dépend précisément de sa température. En donnant la température de couleur d'une lumière, on indique donc que sa composition spectrale est analogue à celle de la lumière émise par le corps noir porté à la température indiquée.) Les étalons B et C résultent de l'emploi de la même lampe placée derrière des filtres colorés formés de solutions de composition bien déterminée, dans lesquelles entrent notamment des sels de cuivre et de cobalt. Leurs températures de couleur sont respectivement de 4 800 et 6 500 °K. Les lumières blanches B et C se rapprochent des lumières du Soleil et du ciel bleu. La *figure* 13 montre les répartitions spectrales des lumières blanches pour les trois sources étalon A, B et C.

On utilise aussi quelquefois une lumière blanche théorique dont le spectre serait plat, c'est-à-dire que l'énergie de chaque longueur d'onde serait identique ; on la désigne par W. Pour l'obtenir à peu près, on peut utiliser une source A et un filtre analogue aux précédents de manière à absorber de plus en plus en passant du bleu vers le rouge.

## Longueur d'onde dominante et facteur de pureté

Si l'on superpose un faisceau de lumière blanche de flux lumineux $F_w$ et un faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda_d$ et de flux $F_d$, on réalise un faisceau chromatiquement équivalent de flux $F = F_w + F_d$ à un faisceau coloré quelconque (pourvu qu'il ne soit pas pourpre). $\lambda_d$ est la **longueur d'onde dominante** de la lumière considérée. Elle est communément appelée « teinte » de cette lumière. Ce n'est pas habituellement le maximum de la courbe de répartition spectrale de la lumière considérée ; il arrive même que cette longueur d'onde $\lambda_d$ n'existe pas dans son spectre. Le rapport du flux de la lumière de longueur d'onde dominante au flux total $p = F_d/F$ est appelé *facteur de pureté*. Il vaut 1 pour une lumière monochromatique sans trace de blanc ; on dit alors que la teinte est *saturée* ou *pure ; p* diminue au fur et à mesure que la lumière est de plus en plus lavée de blanc.

Les grandeurs $p$ et $\lambda_d$ déterminent la chromaticité d'une couleur (facteur de pureté et longueur d'onde dominante). Maxwell puis H. Grassmann ont montré que toute sensation colorée pouvait s'obtenir en superposant les lumières de trois sources de couleurs bien choisies ; ce sont les sources primaires. Cette propriété de l'œil est appelée **trichromie.** De très nombreuses expériences effectuées avec beaucoup d'observateurs ont conduit à choisir les couleurs **rouge, verte** et **bleue** comme sources primaires.

Térence le Goubin - Rapho

▲ *Une salle de contrôle de la télévision en couleurs à la B.B.C. en Grande-Bretagne.*

Richard Colin

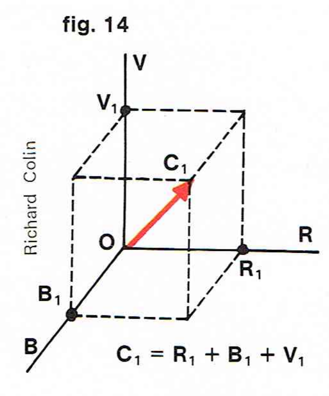
◀ *Figure 13 : répartition spectrale des lumières blanches pour les trois sources étalon conventionnelles (A, B et C).*

## Trichromie - Mesure de la couleur

En partant des sources primaires dont nous allons écrire les luminosités, respectivement R, V et B pour rouge, vert et bleu, il est possible généralement d'équilibrer la luminosité d'une source C de couleur quelconque, d'une seule façon. L'équilibrage se traduit par la relation

$$C_1 = R_1 + V_1 + B_1$$

La *figure* 10 du mélange additif illustre cette possibilité d'équilibrage pour des mélanges deux à deux et pour les trois primaires à la fois, leur intensité étant réglée de manière à donner du blanc. Il y a des cas cependant où le mélange des couleurs primaires doit se faire d'une façon




▲▶ *Figure 14 : espace* OR, OV *et* OB *avec le vecteur qui représente la couleur* $C_1$ *permettant l'équilibrage des couleurs (voir développement dans le texte). Figure 15 : diagramme colorimétrique; les lumières monochromatiques se situent sur la courbe* BPQVDR *dite « lieu du spectre »; la position du blanc est indiquée par le point* W.

un peu différente : l'équilibrage est alors possible avec un dosage de deux primaires, pourvu que l'on ajoute un peu de la troisième à la lumière que l'on se propose d'équilibrer. On écrira alors

$$C_2 + R_2 = V_2 + B_2$$

ce qui peut se ramener au cas précédent, en admettant que R puisse prendre des valeurs négatives. Ainsi donc, toute lumière peut être représentée par un vecteur dans un espace à trois dimensions dont les axes seraient OR, OV et OB. L'origine correspond à l'extinction totale des trois couleurs et donc au noir. La direction du vecteur OC indique la proportion dans laquelle chaque primaire intervient. La longueur OC est proportionnelle à la luminosité de la source C. Ainsi donc, pour une même couleur, nous pouvons avoir des luminosités différentes, ce que l'on pouvait, bien sûr, prévoir, et comme il s'agit pour le moment de mesure de la couleur, nous allons laisser de côté ce paramètre et, par conséquent, ne pas chercher à connaître la longueur du vecteur OC (*fig.* 14).

Si l'on s'arrange pour doser au départ les luminosités des trois sources primaires de telle manière que leur addition en quantités égales donne du blanc, celui-ci est représenté dans la *figure* 14 par la diagonale du cube telle que OR = OV = OB. On utilise alors, pour représenter le vecteur OC, ses cosinus directeurs qui s'écrivent :

$$r = \frac{OR}{OR + OV + OB} \qquad v = \frac{OV}{OR + OV + OB}$$

$$b = \frac{OB}{OR + OV + OB}$$

En remarquant que $r + v + b = 1$, il nous suffira de deux paramètres pour connaître la couleur considérée. Nous avons vu précédemment que l'équilibrage d'une couleur quelconque pouvait introduire l'emploi d'un flux négatif. Afin d'aboutir à une représentation graphique dans un plan qui n'utilise que des valeurs positives des paramètres, la Commission internationale de l'éclairage a remplacé en 1931 les paramètres *r*, *v* et *b* par des fonctions linéaires bien choisies qui donnent *x*, *y* et *z*. Tout se passe comme si on remplaçait les étalons physiquement réalisables R, V et B par trois étalons fictifs X, Y et Z que l'on appelle les *composantes trichromatiques*. Elles ont été choisies de telle manière que toute couleur soit représentée dans le premier quadrant, que le blanc corresponde à $x = 1/3$ et $y = 1/3$ (le dernier paramètre complète la somme à 1 et n'est donc pas représenté, $z = 1/3$), et que la somme des coefficients de R, V et B dans chaque étalon X, Y, Z soit la même. On a adopté internationalement les coefficients suivants, en tenant compte de la sensibilité de l'œil moyen :

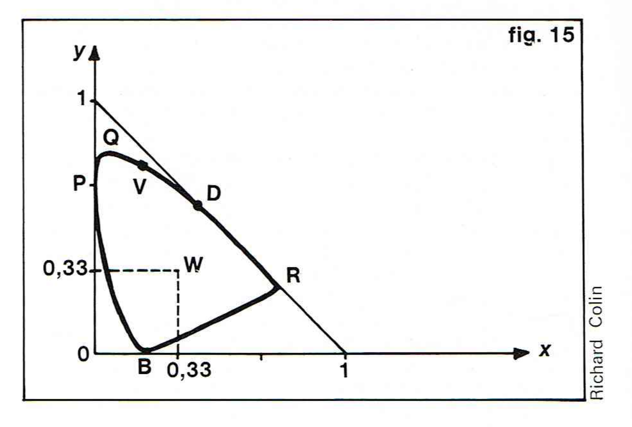
$$\begin{aligned} X &= 2{,}796\,R + 1{,}752\,V + 1{,}130\,B \\ Y &= 1{,}000\,R + 4{,}591\,V + 0{,}060\,B \\ Z &= 0{,}057\,V + 5{,}594\,B \end{aligned}$$

Dans la pratique, les *coefficients trichromatiques* permettent de représenter toutes les couleurs dans un triangle rectangle dont les côtés perpendiculaires valent 1. En réalité, les couleurs sont représentées par des points compris à l'intérieur d'une surface délimitée par la droite BR et la courbe BPQVDR. Dans ce *diagramme colorimétrique* (*fig.* 15), les lumières monochromatiques se situent sur la courbe BPQVDR dite « lieu de spectre ». La droite BR est le lieu des pourpres purs. Le centre de gravité du triangle représente le blanc d'égale énergie W qui a comme coordonnées $x = 1/2$ et $y = 1/3$. Si sur la figure qui montre le diagramme colorimétrique, une courbe $\Gamma$ représente les couleurs du corps noir à différentes températures, les points A, B et C correspondent aux étalons de lumière blanche précédemment décrits. D'après les lois de Grassmann, une lumière équivalant au mélange de deux lumières représentées par les points $C_1$ et $C_2$ est elle-même représentée par un point C situé sur le segment de droite joignant $C_1$ à $C_2$. Sa position est calculable à partir des valeurs de X, Y, Z des deux lumières composantes par la relation :

$$\frac{CC_1}{CC_2} = \frac{X_1 + Y_1 + Z_1}{X_2 + Y_2 + Z_2}$$

Deux couleurs complémentaires sont représentées par des points tels que leur composition harmonique donne le point W. Une demi-droite partant de W et passant par le point C représentant une couleur quelconque rencontre la courbe BPQVDR en un point D correspondant à la longueur d'onde dominante $\lambda_d$ de cette couleur. La position de C sur le segment WD détermine la pureté de la couleur, dont le facteur de pureté est donné par :

$$p = \frac{y_d}{y}\,\frac{y - 1/3}{y_d - 1/3}$$




## Perception des couleurs - Trivariance visuelle

Les valeurs de la longueur d'onde dominante $\lambda_d$ et du coefficient de pureté *p*, ou bien les valeurs de deux paramètres *x* et *y*, caractérisent une couleur, indépendamment de l'intensité de la lumière correspondante. Elles doivent donc être complétées par une grandeur photométrique qui est la **luminance.** De manière à introduire les luminances pour le rouge $L_R$, le vert $L_V$ et le bleu $L_B$, on divise dans X et Z les coefficients de R, V et B par les coefficients de RVB dans Y. On obtient :

$$\begin{aligned} X &= 2{,}769\,L_R + 0{,}382\,L_V + 18{,}80\,L_B \\ Y &= L_R + L_V + L_B \\ Z &= 0{,}012\,3\,L_V + 93{,}07\,L_B \end{aligned}$$

Y n'intervient que pour la luminance, tandis que X et Z déterminent la couleur.

En fait, on peut constater que la perception des couleurs est affectée par la valeur de cette luminance, bien que cela ne se produise que pour des luminances très faibles ou très fortes. Les trois facteurs indiqués ci-avant ne sont donc pas complètement indépendants, et il arrive qu'ils interagissent, bien que très faiblement. L'analyse de ces phénomènes est compliquée du fait qu'elle fait intervenir l'impression toujours un peu subjective de l'observateur; on ne peut en tirer une conclusion valable qu'en procédant à une étude statistique sur de nombreux observateurs. On constate ainsi des sensibilités à la teinte et à la pureté variables selon les individus. Les plus petites variations de pureté décelables sont données sur la *figure* 16 autour du blanc et au voisinage de la saturation en fonction de la longueur d'onde. La *figure* 17 montre, elle, la plus petite variation de longueur d'onde décelable pour une lumière monochromatique.

Il est intéressant de porter sur le diagramme colorimétrique les plus petites variations des coefficients trichromatiques que l'œil puisse déceler. C'est ce qu'a fait Mac Adam qui a obtenu des ellipses. Cela a été mis à profit dans le procédé américain de télévision en couleurs (NTSC) qui transmettait, outre Y pour la luminance, deux signaux de **chrominance** obtenus par combinaison de R, B et Y, soit I et Q tels que :

$$\begin{aligned} I &= 0{,}74\,(R - Y) - 0{,}27\,(B - Y) \\ Q &= 0{,}48\,(R - Y) + 0{,}41\,(B - Y) \end{aligned}$$

Ces représentations ont été choisies parce que le segment WQ joignant le blanc W à la couleur représentée par Q découpe sur les ellipses de Mac Adam une corde plus longue que celle découpée par le segment WI. On peut ainsi se permettre de transmettre moins d'informations et donc moins de détails par le signal Q que par le signal I, puisque l'œil est moins sensible aux écarts de couleur dans la direction WQ. D'un point de vue pratique, cela autorise une transmission du signal Q avec une bande de fréquences de largeur inférieure à celle attribuée au signal I.

## *Réalisation de la trichromie en télévision en couleurs*

Comme dans le tube de télévision en noir et blanc que nous avons déjà étudié, la restitution de l'image s'obtient en modulant l'intensité d'un faisceau d'électrons qui frappe une substance s'illuminant sous l'impact des électrons. Mais, puisqu'il s'agit de restituer des images en couleurs, on met à profit ce que l'on sait de l'obtention des couleurs par trichromie. Pour ce faire, on utilise trois substances, ou *luminophores,* donnant trois couleurs propres à la synthèse trichrome, c'est-à-dire rouge, vert et bleu.

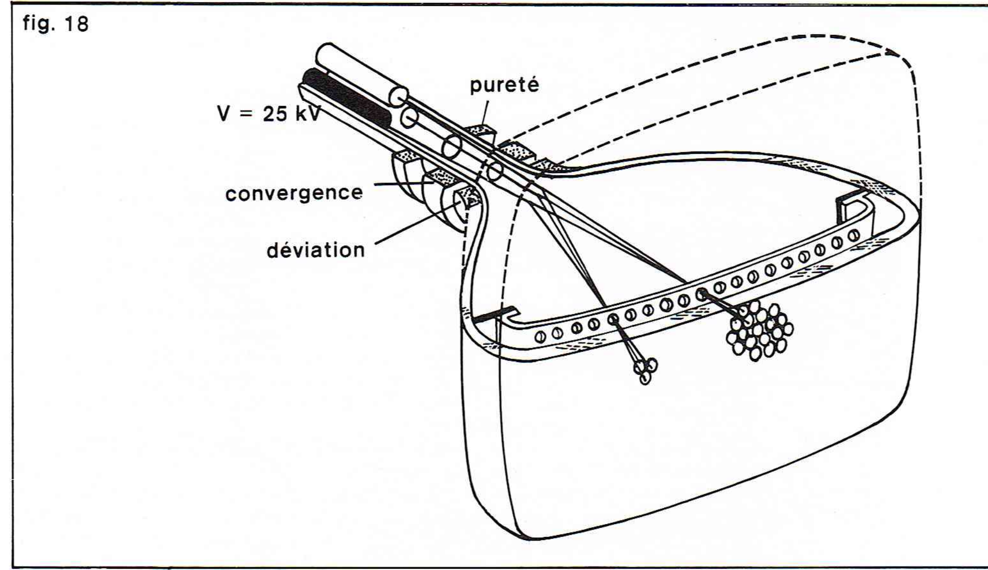
Les luminophores rouges, verts et bleus sont disposés sur la face interne de l'écran du tube cathodique, suivant une disposition géométrique particulière qui leur permet de n'être atteints respectivement que par les électrons issus d'un seul canon sur les trois que comporte le tube trichrome. En effet, la brillance de chaque zone de l'écran va résulter de l'addition des luminosités des trois types de sources émettant proportionnellement au nombre d'électrons que chacune d'entre elles reçoit. L'impression de couleur sera donnée par le fait que l'œil intègre la surface de l'écran en réalisant ainsi une synthèse additive des couleurs selon les règles que nous avons exposées ci-avant.

## *Les tubes trichromes pour la télévision en couleurs*

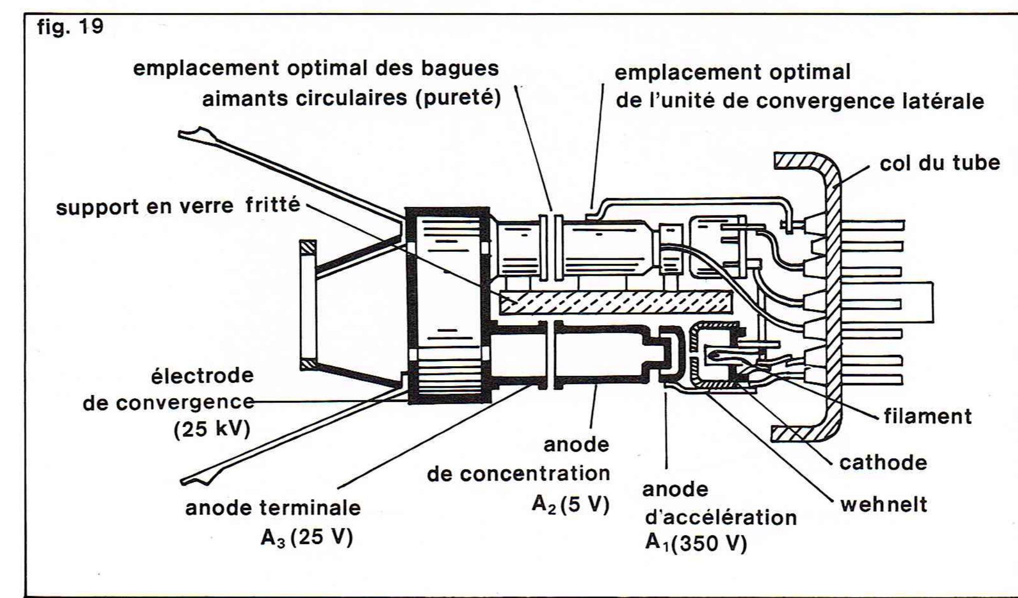
Nous commencerons par décrire le tube à masque qui, s'il est progressivement abandonné pour laisser la place à des tubes plus modernes, a été le premier tube industriel équipant les téléviseurs en couleurs. Il a d'abord été réalisé avec un angle de déviation de 90°, puis, suivant avec un peu de retard les perfectionnements du tube noir et blanc, avec un angle de 110°. C'est le tube qui équipe encore la plupart des téléviseurs couleurs en service actuellement, bien que, depuis l'année 1976, l'emploi du tube à canons alignés se soit généralisé.

L'écran rectangulaire du tube à masque compte environ 1 200 000 points circulaires luminophores des trois composées donnant les trois couleurs de base. Nous les appellerons rouges, verts et bleus puisqu'ils émettent des lumières de chacune de ces couleurs quand ils sont frappés par les électrons. Ces points sont régulièrement répartis en 400 000 triplets environ, dont chacun est composé d'un point rouge, d'un point vert et d'un point bleu disposés côte à côte en formant un triangle équilatéral (*fig.* 11). Ces points sont bombardés sélectivement suivant la couleur par trois canons électroniques contigus R, V, B, à travers un masque en tôle d'acier perforé d'autant de trous qu'il y a de triplets sur l'écran, c'est-à-dire environ 400 000. En anglais, ce masque s'appelle « shadow mask » parce qu'il fait ombre aux points des triplets qui ne sont pas relatifs à un canon déterminé. Autrement dit, le masque empêche les électrons émis par un canon d'aller frapper les points luminophores d'une autre couleur. Par les trous du masque, chaque canon ne voit que les points d'une seule couleur, c'est pourquoi on repère aussi les canons en utilisant les trois lettres R, V, B. Cela exige évidemment une très grande précision dans la construction du tube pour que la disposition de ses éléments soit rigoureuse et, en particulier, l'alignement des canons, des trous du masque et des points des luminophores. Pour obtenir des teintes pures, il faut que les électrons d'un canon n'atteignent rigoureusement que les luminophores de la même couleur, et cela sur toute la surface de l'écran. Cette condition impose donc que l'angle d'incidence soit le même pour tout l'écran afin que, nulle part, les électrons du canon rouge, par exemple, n'atteignent de points verts ou bleus. Les difficultés de convergence sont très grandes et nécessitent beaucoup de circuits électroniques ; au niveau du tube, cependant, on rend les choses moins difficiles en faisant dans le masque des trous dont le diamètre diminue du centre du masque vers les bords.

Les trois canons du tube à masque sont identiques et disposés parallèlement à 120° l'un de l'autre, comme on le voit sur la *figure* 18. La *figure* 19 montre l'assemblage des

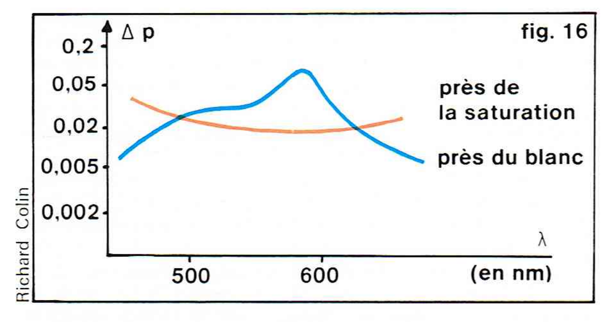


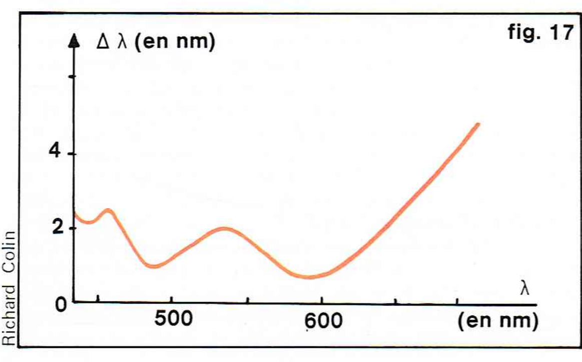
Richard Colin



Richard Colin

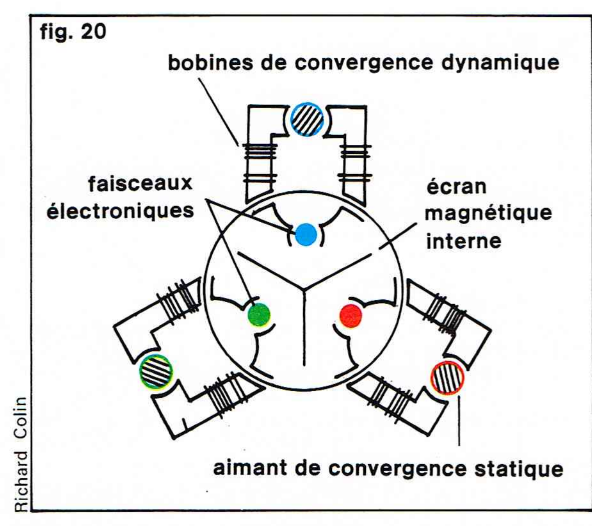
▲ *Figure 18 : disposition en* Δ *des canons électroniques du tube à masque (d'après A. Doris,* Le Haut-Parleur, n° 1585*).*
*Figure 19 : détail de l'assemblage des canons du tube à masque (d'après Ch. Dartevelle,* **Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs,** *Éditions Radio).*



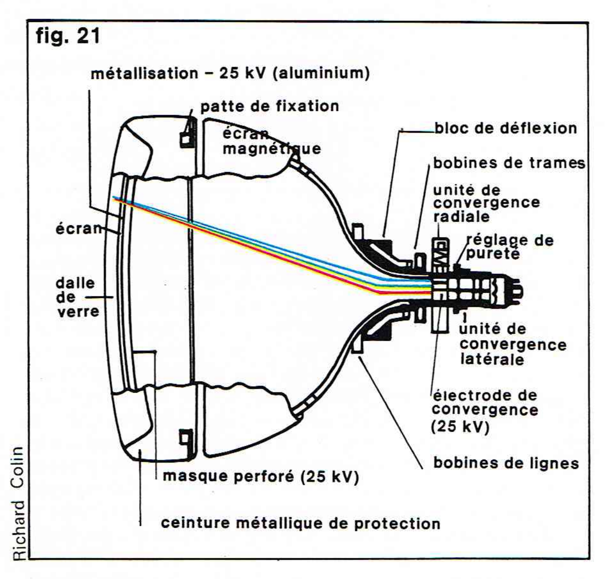

◄ *Figure 16 : les plus petites variations de pureté décelables pour chaque longueur d'onde, suivant que l'on est au voisinage de la saturation ou du blanc.*
*Figure 17 : le plus petit écart de couleur décelable pour chaque longueur d'onde.*

▶ *Figure 20 : coupe transversale de l'unité de convergence radiale du tube trichrome à masque.*




▶ *Page ci-contre à gauche, figure 22 : dans le cas du tube à masque : a, signaux de correction de l'effet de coussin dans le sens horizontal de l'image; b, signaux de correction dans le sens vertical de l'image (d'après Ch. Dartevelle,* Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs, *Éditions Radio). Figure 23 : problème de la convergence des faisceaux dans un tube à masque; en O, convergence correcte des 3 faisceaux au centre de l'écran; dès que les faisceaux sont déviés, ils ne convergent plus sur le masque (en* A *et* A'*) [d'après Ch. Dartevelle,* Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs, *Éditions Radio].*

canons avec leurs différentes électrodes. Chaque canon comprend une cathode à oxyde à chauffage indirect C, une électrode de commande d'intensité du flux électronique ou wehnelt W et un ensemble d'électrodes constituant une lentille électrostatique à la fois accélératrice et focalisatrice, les électrodes étant portées à des tensions positives croissantes de 400 V pour $A_1$ à 5 000 V pour $A_2$ et 18 kV pour $A_3$, qui est donc portée au potentiel de la THT. Les électrodes $A_2$ et $A_3$ des trois canons sont au même potentiel, et en bout des trois canons se trouve l'électrode de convergence portée au même potentiel que l'anode $A_3$. Cette électrode de convergence est constituée d'un séparateur magnétique en forme d'Y, de trois pôles à 120° et de 6 pièces polaires radiales comme le montre la *figure* 20. Sur cette figure apparaissent des éléments externes au tube qui sont destinés à régler la convergence radiale, comme nous le verrons par la suite. Chaque paire de pièces polaires sert à concentrer autour de l'un des faisceaux le flux magnétique donné par un aimant permanent et par une bobine de convergence dynamique.




▶ *Figure 21 : coupe longitudinale du tube trichrome à masque (d'après Ch. Dartevelle,* Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs, *Éditions Radio).*

Une coupe schématique de l'ensemble du tube trichrome à masque est donnée sur la *figure* 21. Le masque est en tôle d'acier épaisse de 0,15 mm, percé d'environ 400 000 trous par un procédé d'attaque à l'acide; les trous ont un diamètre de 0,4 mm et sont écartés de 0,74 mm. Comme il reste beaucoup de matière entre les trous, un grand nombre des électrons émis par les canons sont arrêtés par le masque. La transparence de ce dernier n'est que de 17 % en son centre, c'est donc 83 % des électrons accélérés sous 25 kV qui frappent le masque et qui y transforment leur énergie cinétique en chaleur. Il y a là aussi un problème à résoudre pour l'évacuation de cette chaleur vers l'extérieur.

## *Fabrication du tube à masque*

L'ampoule de verre du tube à masque est fabriquée en deux parties : d'une part le cône et la partie cylindrique contenant les canons électroniques, d'autre part l'écran qui est fait une dalle de verre en forme de cuvette rectangulaire très épaisse (12 mm), conçue pour résister à l'énorme pression qui s'exerce sur elle, due à la pression atmosphérique de l'extérieur, alors qu'à l'intérieur règne le vide. Les parois de cette cuvette ont leur bord dressé et poli; à l'intérieur, trois plots métalliques permettent la fixation du masque perforé.

Le dépôt des substances luminescentes constituant les luminophores se fait de la manière suivante : sur une dalle qui a été très soigneusement nettoyée, on verse une suspension photosensible de l'un des luminophores. Après que le produit photosensible s'est bien étalé sous l'action d'une rotation du tube et qu'il a été convenablement séché, on fixe le masque perforé sur les plots prévus dans la ceinture de la dalle. Une source ultraviolette ponctuelle judicieusement placée impressionne la couche photosensible à travers le masque perforé. Un lavage à l'eau enlève les endroits de la couche qui n'ont pas été impressionnés. On recommence les opérations pour les deux autres luminophores en prenant soin de toujours utiliser le même masque pour la même dalle. Avant de sceller le tube, on dépose par évaporation une mince couche d'aluminium par-dessus les luminophores, comme dans le tube noir et blanc. Ensuite, les deux parties du tube sont assemblées par un collage étanche au vide. Il reste à préparer ce tube pour son montage dans le téléviseur. En plus des systèmes de déviation et de convergence qui viennent s'adapter sur la partie cylindrique du tube, une tôle vient protéger le cône. Elle est fixée à une armature très rigide entourant la dalle, cette armature portant elle-même quatre pattes destinées à la fixation du tube.

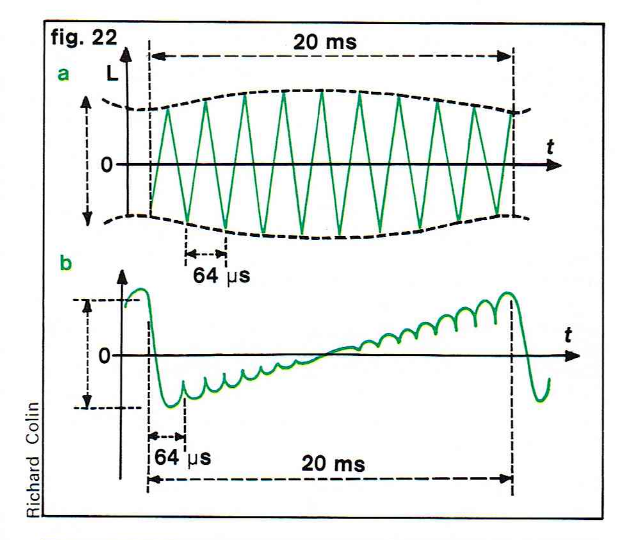
La tôle entourant le cône sert aussi de blindage contre les champs extérieurs parasites.

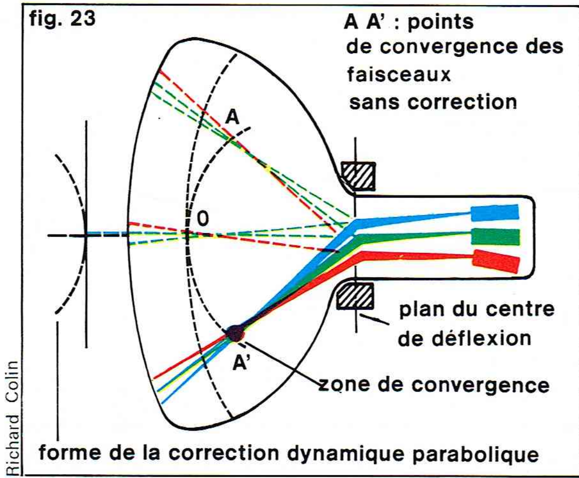
L'emploi de ce tube cathodique destiné à la reconstitution d'images en couleurs nécessite préalablement un certain nombre de réglages; quelques-uns sont d'ailleurs à peu près les mêmes que pour un tube noir et blanc : la focalisation, le centrage, les balayages horizontal et vertical et les synchronisations pour ce qui est comparable au tube noir et blanc, avec, en plus, les réglages de convergence latérale statique et dynamique et le contrôle de pureté de couleur. Tous ces réglages sont effectués en usine par le constructeur du poste récepteur, l'utilisateur ayant, quant à lui, uniquement accès aux ajustements de contraste et de luminosité, comme dans un poste noir et blanc. L'équilibrage de couleur sur lequel il peut aussi jouer agit sur des circuits électroniques autres que ceux du tube.

Dans le tube à masque, la **focalisation** est réglée en agissant séparément sur chaque canon par l'intermédiaire de l'électrode $A_2$ de la lentille électrostatique $A_1A_2A_3$. On focalise sur le masque, et les faisceaux donnent alors une tache d'environ 1 mm de diamètre. Ils traversent plusieurs trous voisins les uns des autres et frappent plusieurs triplets R, V, B sur l'écran.

Le **centrage** s'opère en amenant cette tache au milieu de l'écran, en jouant sur la valeur du courant continu qui traverse les bobines de déviation; les tensions en dents de scie de balayage sont supprimées.

Le bloc de déflexion (ou déviation) agit comme dans un téléviseur noir et blanc, et a d'ailleurs à peu près la même constitution. Les bobines sont en forme de selle de manière à épouser le mieux possible la forme du tube; deux paires de bobines provoquent, l'une la déviation verticale, l'autre la déviation horizontale. Pour cela, elles sont parcourues par des courants en dents de scie fournis par les oscillateurs de balayage de lignes et de trames. Si ces dents de scie sont bien linéaires, l'image présente une distorsion. Pour la corriger, on agit sur l'amplitude des lignes en la diminuant en haut et en bas de l'écran, comme le montre la *figure* 22a, et, enfin, en superposant au courant de balayage de trame une composante parabolique ayant la fréquence des lignes, ce qui se voit sur la *figure* 22b, si bien que chaque début et chaque fin de ligne est corrigé en amplitude de manière tout à fait identique à la correction directe sur les lignes de la *figure* 22a. Ces figures portent des indications de




Vidéocolor

durée permettant de rapporter des corrections aux durées de balayage.

A cause de la symétrie en delta (Δ) représentant la disposition triangulaire des trois canons du tube trichrome, en l'absence de balayage, il est aisé de faire converger les trois faisceaux au centre de l'écran. Malheureusement, quand ils sont déviés, le point de convergence des trois faisceaux ne reste pas sur le masque, comme le montre la *figure* 23. Il est donc indispensable d'apporter des **corrections de convergence** si l'on veut être sûr que chaque faisceau vienne bien frapper les luminophores correspondant à sa couleur. Ce sont les corrections les plus délicates à apporter et aussi celles qui nécessitent le plus de circuits ; nous verrons par la suite que l'on dispose maintenant de nouveaux tubes-images dont l'avantage essentiel est d'être autoconvergents et, par conséquent, de nécessiter beaucoup moins de réglages.

Examinons tout de même rapidement comment sont effectuées les corrections de convergence dans un tube à canons en delta.

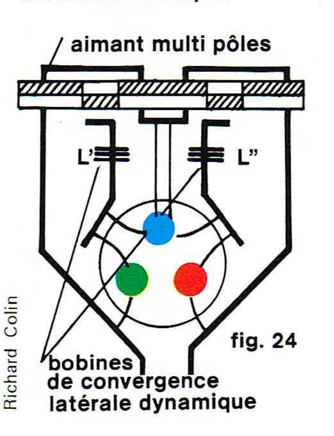
Pour ramener chaque faisceau à converger avec les autres sur le masque, quelle que soit leur déviation à un moment donné, il faut lui appliquer une déviation supplémentaire dans une direction déterminée. On repère cette direction de déviation supplémentaire par ses deux projections dans un plan perpendiculaire à l'axe du tube suivant une direction radiale et une direction normale à la précédente. La déviation supplémentaire suivant le rayon est produite par le dispositif de *convergence radiale*, la déviation supplémentaire suivant la direction perpendiculaire est produite par le dispositif de *convergence latérale*. La convergence radiale au centre de l'écran est ajustée par l'action d'un champ magnétique constant pour chaque faisceau d'électrons, qui est obtenu par un ensemble d'aimants permanents fixés sur l'unité de convergence radiale que schématise la *figure* 20 : en haut de chaque branche de l'étoile se trouve l'aimant permanent de convergence statique dont les lignes de champ sont conduites jusqu'au faisceau par un circuit magnétique en ferrite, et à l'intérieur du tube par les pièces polaires radiales. La correction statique permet d'ajuster la convergence des trois faisceaux au centre de l'écran, mais elle n'est pas suffisante pour les angles de déviation maximale du faisceau correspondant aux coins de l'écran ; il faut lui ajouter une correction dite « dynamique ».

La position du spot sur l'écran est fonction du courant traversant les bobines de déviation assurant le balayage, et comme, précisément, la correction de convergence doit tenir compte de la position du spot, il est assez naturel d'utiliser les courants de balayage pour commander aussi les circuits de convergence dynamique. Cependant, chaque faisceau doit être dévié de façon légèrement différente en fonction de la position du canon par rapport à celle du spot. Il y a donc un système de bobines particulier pour la correction de convergence de chaque faisceau. Ces bobines apparaissent sur la *figure* 20, elles sont placées autour des branches du circuit magnétique en ferrite qui conduit le flux magnétique jusqu'au faisceau, et il y a trois ensembles de ce type pour les trois branches de l'étoile constituant l'unité de convergence radiale.

Mais nous savons aussi qu'il est nécessaire de disposer d'une autre composante de déviation supplémentaire pour rétablir complètement la convergence en tout point de l'écran. C'est le rôle de l'unité de convergence latérale dont le schéma est donné sur la *figure* 24. Comme pour la précédente, son action est divisée en un réglage statique et un réglage dynamique : l'élément de correction statique est composé de plusieurs aimants permanents fixés sur un support métallique conduisant bien les lignes de champ magnétique, lui-même enfilé sur la partie cylindrique à l'extérieur du tube cathodique. La disposition des aimants et des pièces polaires provoque des déplacements latéraux des faisceaux et permet ainsi de parfaire la convergence statique au centre de l'écran. Les corrections dynamiques latérales de convergence résultent de l'action de deux bobines disposées sur les branches du montage précédent.

▲ ***La structure de l'écran Delta de Videocolor : les points rouges, verts et bleus (luminophores), répartis sur la face interne de l'écran du tube cathodique suivant une disposition en Δ, s'illuminent sous l'impact des électrons.***

▼ ***Figure 24 : coupe de l'unité de convergence latérale du tube trichrome à masque.***



▶ *Page ci-contre, en haut, à gauche et à droite, figure 25 :* a, *éclaté du tube trinitron (1, canon unique à trois faisceaux en ligne; 2, grande lentille; 3, grille à fentes continues; 4, écran à bandes verticales de phosphore; 5, écran cylindrique; 6, écran à grand angle : 114°);* b, *détail du tube trinitron.*

On leur applique un courant fonction de celui qui provoque le balayage ligne.

Malgré toutes les précautions dont on s'entoure pendant la fabrication du tube-image pour obtenir une grande précision dans l'alignement des canons, des trous du masque et des points luminophores, le jeu mécanique des pièces du tube lors de l'assemblage peut amener un certain désalignement. Il en résulte que les points luminophores ne sont plus frappés en leur centre par les faisceaux issus des canons électroniques. En cas de trop fort désalignement, il se peut même qu'un canon envoie ses électrons à cheval sur deux points luminophores. Dans ce cas, la pureté des couleurs s'en trouve sérieusement affectée, et il s'impose de remédier à tout désalignement accidentel. Les réglages que l'on introduit pour ce faire sont les **réglages de pureté**. Le dispositif est statique et constitué encore d'aimants permanents qui sont, cette fois, circulaires et au nombre de deux, montés sur des bagues tournant autour du col du tube cathodique. En les faisant tourner l'une par rapport à l'autre, on change l'intensité du champ magnétique en leur centre et, en les faisant tourner ensemble, on change sa direction. On peut, de la sorte, translater ensemble les trois faisceaux pour les amener à frapper chacun au centre des points luminophores correspondants. Tant qu'il s'agit de régler la pureté au centre de l'écran, la position du bloc de déviation n'a pas d'importance, mais dès que l'on introduit une déviation du faisceau, la position de ce bloc intervient de plus en plus au fur et à mesure que le spot s'approche du bord de l'écran. Une fois réglés les aimants de pureté, on provoque donc une déviation du spot et on ajuste la position du bloc de déviation le long du col pour que la pureté soit bonne sur toute la surface de l'écran. On peut voir sur la *figure* 21 comment sont disposés les différents dispositifs de correction sur le col du tube cathodique ainsi que le bloc de déviation.

Le tube à masque perforé équipe une grande majorité des récepteurs de télévision couleurs en service à l'heure actuelle, et il donne satisfaction en fournissant une image d'excellente qualité. Pourtant, il présente un grand nombre de défauts dont le moindre n'est pas la complexité des circuits de correction qui sont nécessaires pour un bon fonctionnement. Bien sûr, les fabricants fournissent à l'utilisateur un appareil convenablement réglé et, pourvu que la fabrication soit de bonne qualité, ces réglages ne sont à refaire que rarement. Un autre de ses graves défauts est sa consommation élevée : un peu plus de 100 W. Par ailleurs, la construction de ce tube nécessite un grand nombre d'opérations délicates et demandant une grande précision, ce qui conduit à un élément de prix élevé. Tous ces facteurs ont conduit les fabricants de tubes cathodiques à chercher et à mettre au point un tube dont la construction serait moins coûteuse et le fonctionnement plus simple.

## *Tubes autoconvergents*

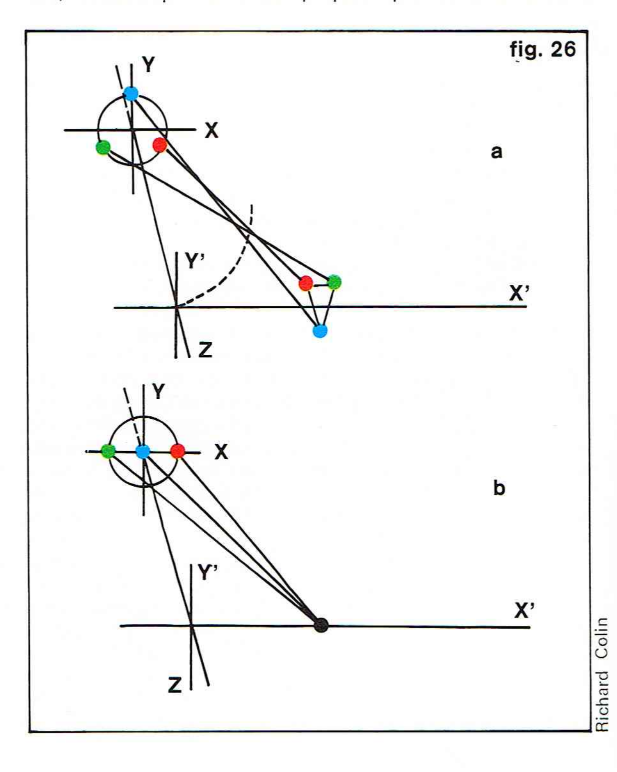
Depuis 1976, grâce à une campagne publicitaire de grande envergure, plus personne n'ignore que ce but a été atteint, du moins par un grand constructeur français. Pour tout dire, le tube à canons en ligne, puisque c'est de lui qu'il s'agit, équipe déjà les téléviseurs Sony depuis six à sept ans sous une forme, il est vrai, sensiblement différente. Les téléviseurs Philips sont également équipés de tubes à canons en ligne depuis un ou deux ans. Ces nouveaux tubes trichromes sont également appelés « autoconvergents » pour bien faire la différence avec les tubes à masque : l'avantage essentiel de ces nouveaux tubes est effectivement de ne plus nécessiter les éléments de correction de convergence de leurs prédécesseurs. Nous allons immédiatement examiner pourquoi.

D'abord, les trois canons sont disposés côte à côte (on dit en ligne), et les substances luminophores sont déposées en bandes parallèles verticales sur la dalle formant l'écran. Ensuite, le masque à trous est remplacé par une grille dont la transparence est maximale, mais dont le manque de rigidité ne permet pas de dépasser des dimensions d'écran de l'ordre de 51 cm avec un angle de cône de 114° dans le cas du tube Trinitron de Sony (il faut peut-être rappeler ici que la dimension d'un écran de télévision indique la longueur de sa diagonale, ce qui suffit à déterminer sa hauteur et sa largeur, puisque tous les écrans ont le même rapport entre ces deux dimensions, soit 3/4). La *figure* 25 montre un tube trinitron découpé partiellement pour détailler sa constitution interne. Bien que les autres tubes à canons coplanaires soient fondés sur le même principe, leur fonctionnement diffère par quelques points liés principalement au système de déviation, à la constitution des canons électroniques et aussi au dépôt des luminophores.

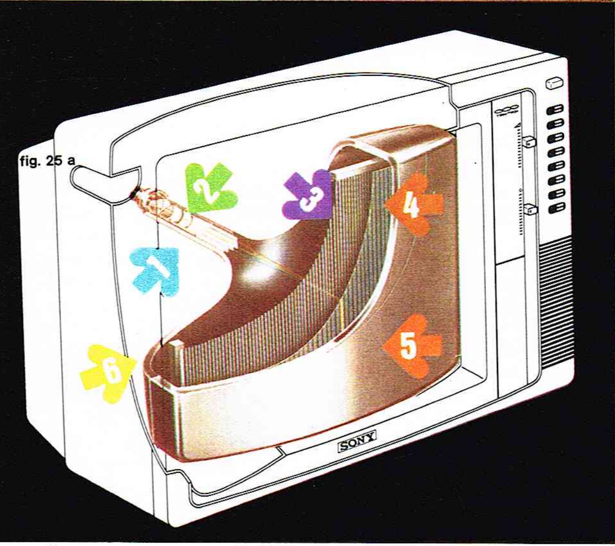
Les deux principaux concurrents sur le marché français en matière de tubes couleurs autoconvergents sont Philips et La Radiotechnique d'une part avec le tube 20 AX, et d'autre part Thomson avec le tube PIL. Nous plaçons un peu à part le cas de Sony qui, encore une fois, a été le précurseur du tube à canons en ligne, mais qui est surtout connu en France des professionnels de la télévision. Le matériel vidéo Sony a une excellente réputation, mais une assez faible pénétration dans le grand public, sauf peut-être en ce qui concerne les téléviseurs portables.

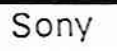
Les inconvénients liés à la convergence des faisceaux interviennent dans le tube à canons en delta quand on introduit une déviation des faisceaux. En d'autres termes, le champ de déviation, qui se comporte comme une optique pour les électrons, est anastigmatique, et le champ focal image, qui est le lieu de croisement des trois faisceaux déviés, ne coïncide plus avec le plan de l'écran. C'est ce qui donne des traces disposées en triangles équilatéraux. Si le champ de déviation est astigmatique, ces triangles se déforment et deviennent isocèles, car la distance entre deux de ces points diminue en même temps qu'elle augmente pour chacun de ces points par rapport au troisième. En augmentant de manière convenable l'astigmatisme du champ de déviation jusqu'à réduire à un seul point les deux points dont nous venons de parler, on élimine dans le sens horizontal l'erreur due à la courbure du champ focal image. Corrélativement, on augmente l'écart dans le sens vertical, mais cette erreur peut être annulée si les canons sont disposés dans un plan horizontal. Tel est le principe de convergence imaginé par Haantjes et Lubben, qui a été mis en application dans le tube 20 AX suivant un brevet pris par Philips.

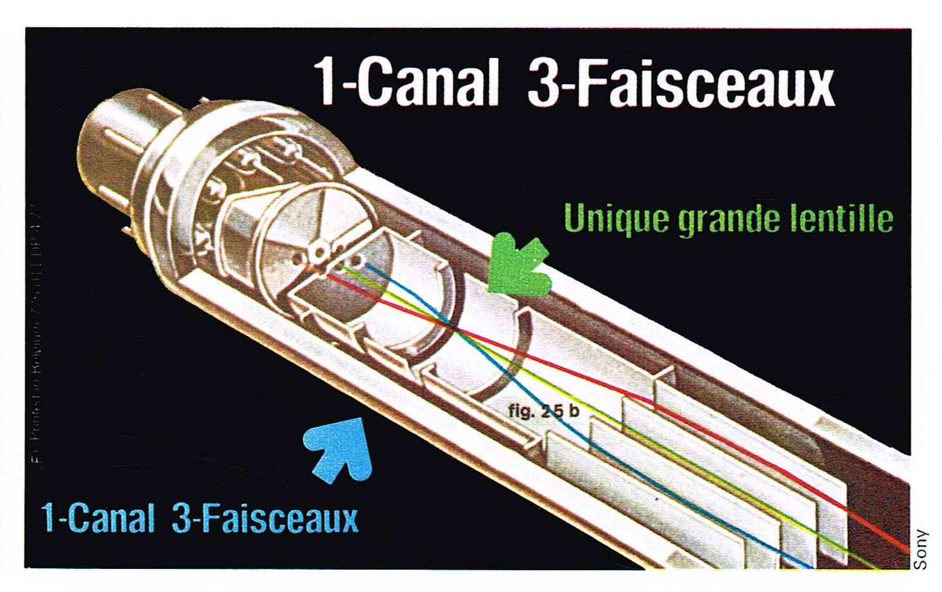
La *figure* 26 montre les influences de la courbure du champ image et de l'astigmatisme du champ de déviation, ainsi que la différence résultant de deux dispositions des canons : en delta et coplanaires. On a ainsi mis à profit un défaut d'astigmatisme du champ de déviation, que l'on dit maintenant « parastigmatique », pour corriger l'erreur de convergence et aboutir de la sorte au tube autoconvergent. Cela ne dispense tout de même pas de régler la convergence au départ, c'est-à-dire au moment de l'ajustement du système de déviation au tube proprement dit. Cependant, ces ajustements sont minimes et, en tout cas, beaucoup moins compliqués que dans le tube à




▶ *Figure 26 : influence d'un champ parastigmatique sur la convergence des faisceaux électroniques de canons disposés en Δ* (a) *et en ligne* (b).

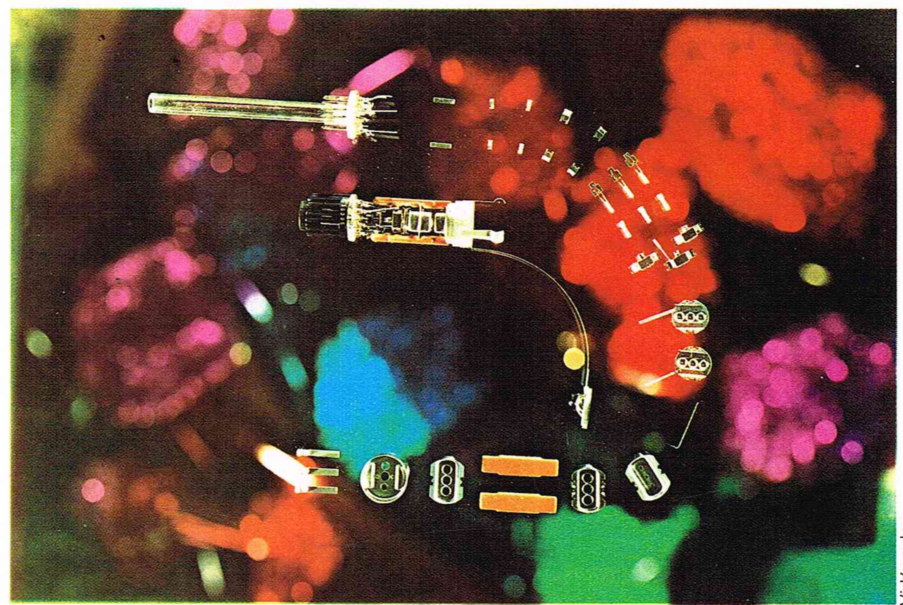


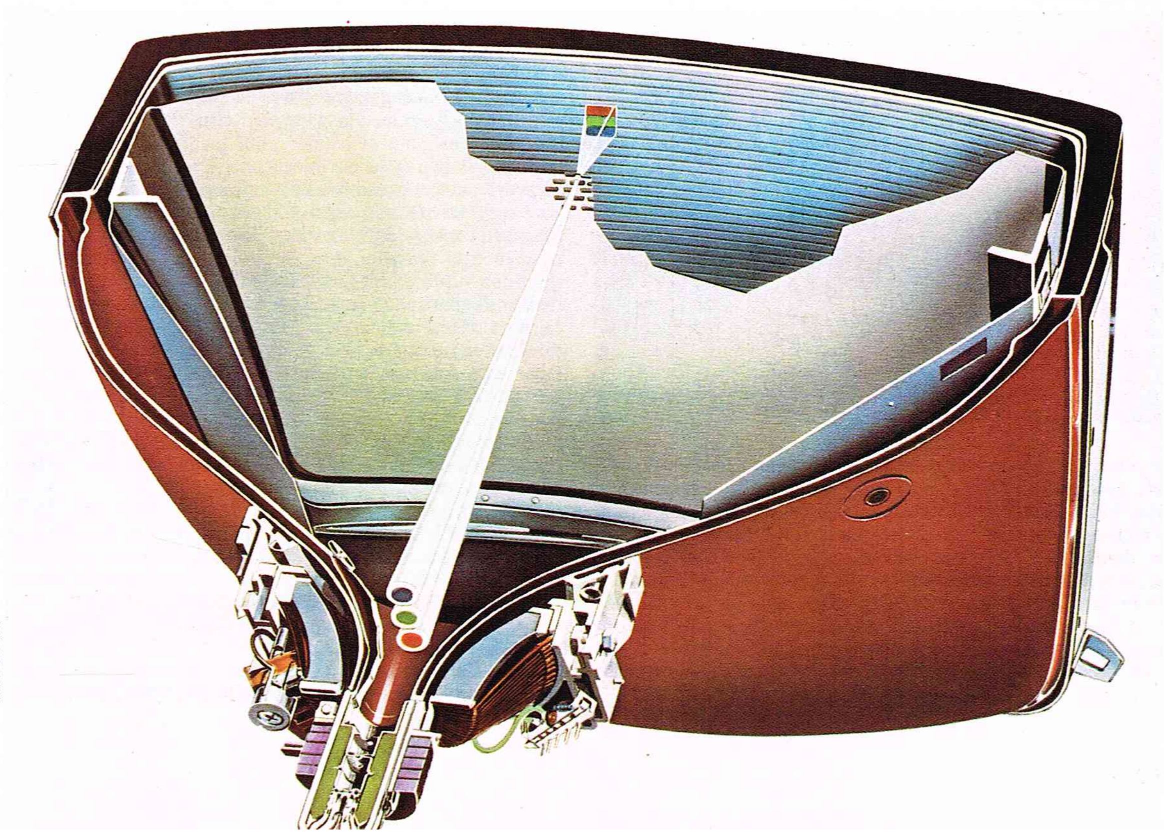




canons en delta, comme nous avons pu le voir précédemment. Ces ajustements sont appliqués, à partir de circuits simples, directement aux bobines de déflexion. Outre la simplification apportée à la construction des téléviseurs, ce nouveau tube conduit à une plus grande fiabilité de l'ensemble, ce qui explique que les constructeurs équipent maintenant tous leurs modèles de tubes autoconvergents. Il existe en effet presque toutes les dimensions d'écran (66 cm, 56 cm, 51 cm et 47 cm) avec un angle de déviation de 110°.

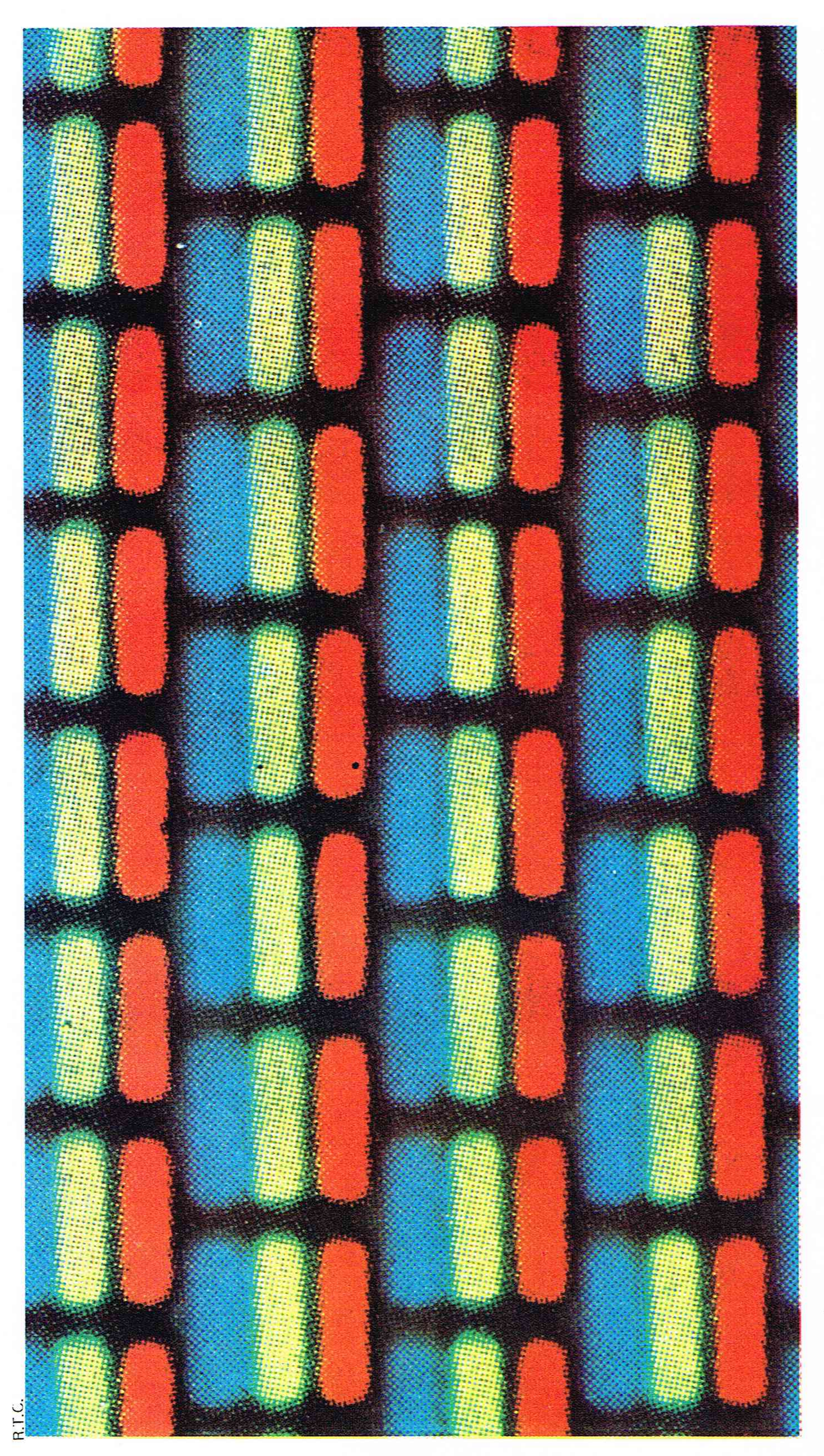
Le second tube autoconvergent que nous allons décrire est celui de Thomson, ou plus exactement de Videocolor, associant Thomson (51 %) et RCA (49 %), dénommé PIL (pour « Precision In-Line »). En ce qui concerne l'écran, le masque et les luminophores, le tube PIL est tout à fait semblable au tube 20 AX. Par contre, les canons électroniques diffèrent sensiblement, ainsi que le système de déviation. Les trois faisceaux sont produits par trois cathodes séparées ; c'est toujours nécessaire, puisque l'on doit commander séparément l'intensité des trois faisceaux, mais toute l'optique électronique de focalisation et d'accélération est commune. On peut ainsi rapprocher les trois faisceaux qui ne sont plus distants que de 5,1 mm, et donc enfermer les canons dans un tube à col plus étroit, ce qui permettra d'utiliser des champs de déviation moins intenses. Le bloc de déviation est également




***▲ Éléments constitutifs d'un canon électronique PIL de Videocolor.***




***◀ Vue éclatée d'un tube autoconvergent PIL de Videocolor.***


R.T.C.

▲ *Structure de l'écran du tube-image 20 AX de la R.T.C.; les substances luminophores sont disposées en bandes parallèles verticales sur la dalle formant l'écran.*

moderne : au lieu des bobines en selle utilisées habituellement, le tube PIL travaille avec un bobinage toroïdal sur des bagues en ferrite obtenues par moulage et pressage, et s'adaptant très précisément au col du tube sur lequel il est fixé définitivement. De la sorte, le bloc de déviation devient partie intégrante du tube, et cela garantit une meilleure constance des réglages au cours du temps, mais fait augmenter le coût de remplacement du tube — ce qui est de plus en plus rare, heureusement. La seule partie mobile autour du col d'un tube PIL est le dispositif de réglage de convergence statique.

## Les procédés de fabrication de l'image couleurs

Il existe trois procédés de transmission de l'image en couleurs, dont deux sont en compétition très serrée. Le procédé américain, qui est le plus ancien à avoir été appliqué commercialement sur une grande échelle, est utilisé essentiellement en Amérique du Nord : c'est le procédé NTSC (National Television System Committee). Il souffre d'un certain nombre de défauts; en particulier, il est très sensible aux conditions de propagation des ondes électromagnétiques qui rendent la transmission des couleurs peu fiable. Il y a sur les récepteurs NTSC un bouton spécial de réglage de couleur qui permet de corriger localement les variations induites à la transmission, mais ce réglage doit être repris assez souvent, même au cours d'une émission, si la transmission est très perturbée par le mauvais temps, par exemple. Aussi, quand il s'est agi de développer la télévision en couleurs en Europe, les différents fabricants se sont-ils préoccupés de mettre au point un procédé débarrassé des imperfections de son prédécesseur. Deux méthodes ont débouché; l'une consistait à utiliser le même principe de modulation que le procédé américain, mais à le modifier suffisamment pour éviter toute influence des conditions de propagation. L'autre mode d'approche a repris complètement le problème à la base et utilise un principe de modulation totalement différent. Bien qu'il ait existé un organisme de concertation devant lequel les tenants des deux systèmes se sont présentés, le choix n'a pas pu se faire en faveur de l'un des deux. Des raisons techniques, et peut-être même plus des raisons politiques, ont fait qu'en Europe les deux procédés coexistent. Il s'agit des procédés PAL, pour « Phase Alternative Line », et SECAM, pour « séquentiel couleur à mémoire ». Le PAL a été mis au point par W. Bruch, des laboratoires Telefunken, et adopté par l'Allemagne fédérale, la Suisse, l'Italie, les Pays-Bas et les pays scandinaves, ainsi que par l'Espagne et l'Algérie, sans les citer tous. Plusieurs versions du SECAM existent, qui appliquent toutes le principe posé par Henri de France, et ses différentes versions sont utilisées en France, en Union soviétique et dans les pays de l'Est principalement.

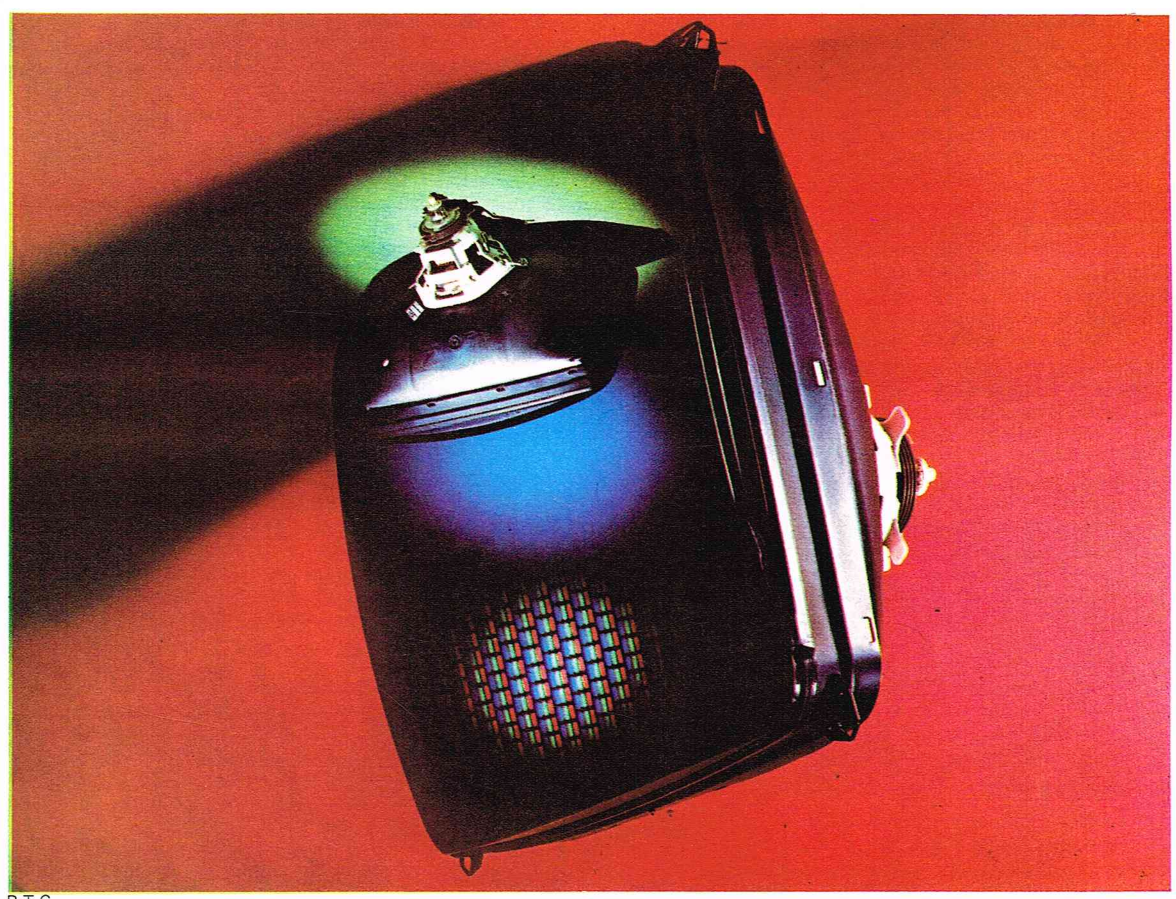
Nous décrirons très rapidement les procédés NTSC et PAL, et nous nous attarderons un peu plus sur le procédé SECAM.

D'un point de vue général, les trois procédés ont en commun un certain nombre de caractéristiques liées à des considérations de sensibilité de l'œil aux impressions colorées. C'est ainsi qu'ils transmettent tous un signal de luminance Y occupant la largeur maximale de bande de fréquences permises, et deux signaux de chrominance. On dispose ainsi de trois variables à partir desquelles on peut reconstituer les intensités des trois primaires R, V et B.

Les recherches sur les propriétés sensorielles de l'œil menées par les laboratoires Hazeltine ont permis de montrer qu'il est inutile de transmettre de fins détails pour les primaires bleu et rouge, pour lesquelles l'œil est peu sensible. Comme la définition, ou finesse, de l'image est directement proportionnelle à la bande passante, on peut se contenter de fréquences allant de 0 à 1 MHz pour le bleu et le rouge. L'image est bonne dans ces conditions, pourvu que l'image verte soit assez fine, avec des fréquences vidéo allant jusqu'à 4 MHz. Puisque le maximum de bande est utilisé pour le signal de luminance composé, comme nous l'avons vu précédemment, de la somme des luminances pour le rouge, le vert et le bleu, il devient avantageux de choisir, pour les signaux de chrominance à transmettre, du rouge et du bleu pour lesquels on n'a besoin que d'une bande réduite. Le vert sera restitué à la réception avec une finesse suffisante par composition du signal de luminance Y et des signaux de chrominance.

Nous ne reviendrons pas sur les problèmes de la compatibilité, sinon pour souligner que les trois procédés la respectent bien, quoiqu'il soit difficile de ne pas perturber un récepteur noir et blanc montrant des images émises en couleurs. Ce récepteur n'a besoin que du signal de luminance qui contient toute l'information en noir et blanc, et on peut considérer que, pour lui, les signaux de chrominance sont des parasites.

La différence essentielle entre les procédés réside dans la manière de transmettre les signaux de chrominance :



◀ *Deux tubes autoconvergents 20 AX à trois canons coplanaires de la R.T.C.*

R.T.C.

les procédés NTSC et PAL utilisent la modulation d'amplitude à suppression de porteuse et le procédé SECAM la modulation de fréquence. De plus, ils ne transmettent pas l'information de chrominance sous la même forme.

Nous avons vu précédemment que le signal de luminance avait été choisi de manière générale comme la composition pondérée des trois couleurs fondamentales R, V et B suivant la règle :

$$Y = 1{,}000\ R + 4{,}591\ V + 0{,}060\ B.$$

Les caractéristiques des tubes amènent, comme en noir et blanc, à corriger l'amplitude de ces différents signaux suivant l'écart à la linéarité; c'est la correction de $\gamma$ qui consiste à remplacer R, V, B et Y par $R^{1/\gamma}$, $V^{1/\gamma}$, $B^{1/\gamma}$ et $Y^{1/\gamma}$. Sans l'oublier, nous n'en tiendrons pas compte dans notre écriture pour ne pas l'alourdir. En normalisant pour que la somme des coefficients soit égale à 1, il vient :

$$Y = 0{,}30\ R + 0{,}59\ V + 0{,}11\ B.$$

Les deux signaux de chrominance sont choisis de telle manière qu'ils soient nuls quand l'image transmise est sans couleur. C'est la raison pour laquelle on a retenu R-Y et B-Y. On obtient, à partir de la relation précédente :

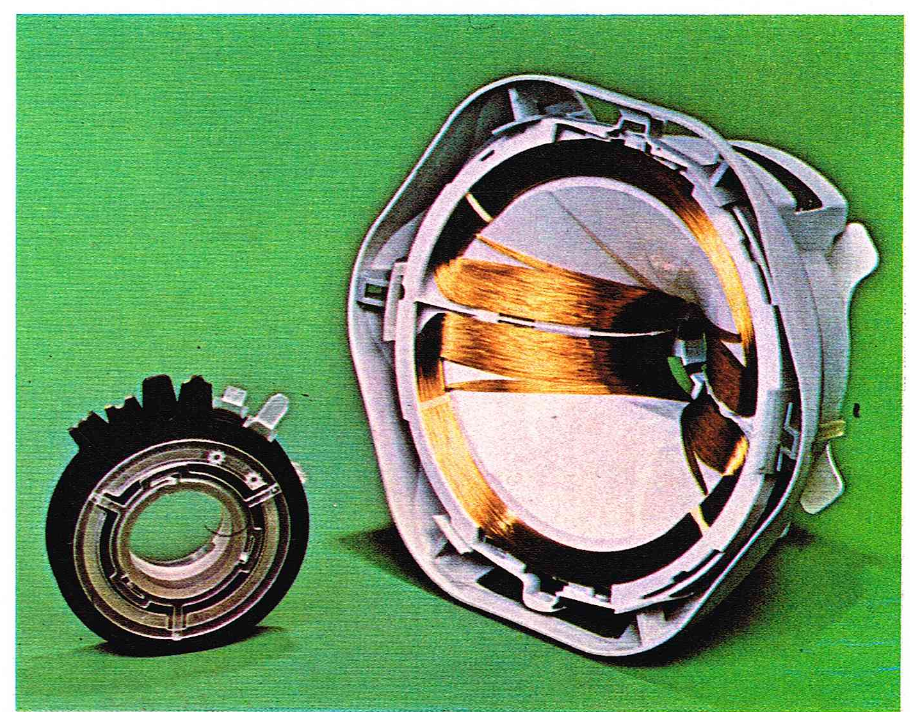
$$V\text{-}Y = -0{,}51\ (R\text{-}Y) - 0{,}178\ (B\text{-}Y).$$

Toutes ces compositions linéaires des signaux seront faciles à réaliser avec des circuits électroniques.

De la sorte, la représentation que nous avions vue du diagramme de chromaticité a un équivalent appelé « plan de chrominance », qui admet comme axes R-Y et B-Y. Le centre de ce plan correspondant à R-Y = 0 et B-Y = 0 donne le blanc, et plus on s'éloigne du centre, plus les couleurs sont saturées.

### *Le procédé NTSC*

L'information de chrominance est constituée de deux signaux qui doivent être transmis par un seul support : la sous-porteuse de chrominance. Le procédé NTSC résout le problème de la façon suivante : la sous-porteuse, de fréquence $F_c$, est divisée en deux composantes en quadrature; chacune d'entre elles est modulée en amplitude à suppression de porteuse par les signaux I et Q que nous avions auparavant et qui valent :



R.T.C.

▲ *L'unité de déviation et l'unité de correction multipôles du tube autoconvergent 20 AX de la R.T.C.*

$$I = 0{,}74\ (R\text{-}Y) - 0{,}27\ (B\text{-}Y)$$
$$Q = 0{,}48\ (R\text{-}Y) - 0{,}41\ (B\text{-}Y)$$

Les deux composantes ainsi modulées sont additionnées et mélangées au signal de luminance. On retrouve donc une seule sous-porteuse de fréquence $F_c$ dont l'amplitude et la phase dépendent des amplitudes des deux composantes modulées par I et Q. Globalement, on peut dire que la teinte de la couleur à transmettre, représentée dans le plan de chrominance par la direction du vecteur, est portée par la phase de la sous-porteuse, alors que son amplitude transmet la saturation.

A la réception, il est nécessaire de recréer sur place la fréquence de la sous-porteuse pour pouvoir effectuer la démodulation de la chrominance, grâce à un oscillateur local. Il faut en plus que cet oscillateur soit convenablement calé en phase par rapport à la sous-porteuse de l'émission, sinon on perd la moitié de l'information de chrominance. Pour ce faire, on transmet une salve de 8 périodes de la sous-porteuse qui est placée dans le palier arrière de l'impulsion de synchronisation de lignes, pendant la suppression du retour de ligne. Ce court signal à la fréquence de la sous-porteuse, se succédant à chaque ligne, suffit, grâce à un circuit de mise en phase, à bloquer l'oscillateur local sur sa fréquence et sur sa phase.

La caractéristique principale du procédé NTSC, et c'est là son inconvénient, est sa grande sensibilité aux erreurs de phase. Outre que tous les émetteurs et tous les relais doivent être équipés de circuits onéreux de correction et de stabilisation de la phase, les récepteurs eux-mêmes sont complexes et nécessitent beaucoup de précision dans leur fabrication et une grande qualité des composants pour assurer une bonne stabilité des performances. Il n'en reste pas moins que nous ne sommes pas maîtres des conditions de propagation des signaux, et, en cas de conditions anormales, il se produit des déphasages qui dénaturent les couleurs.

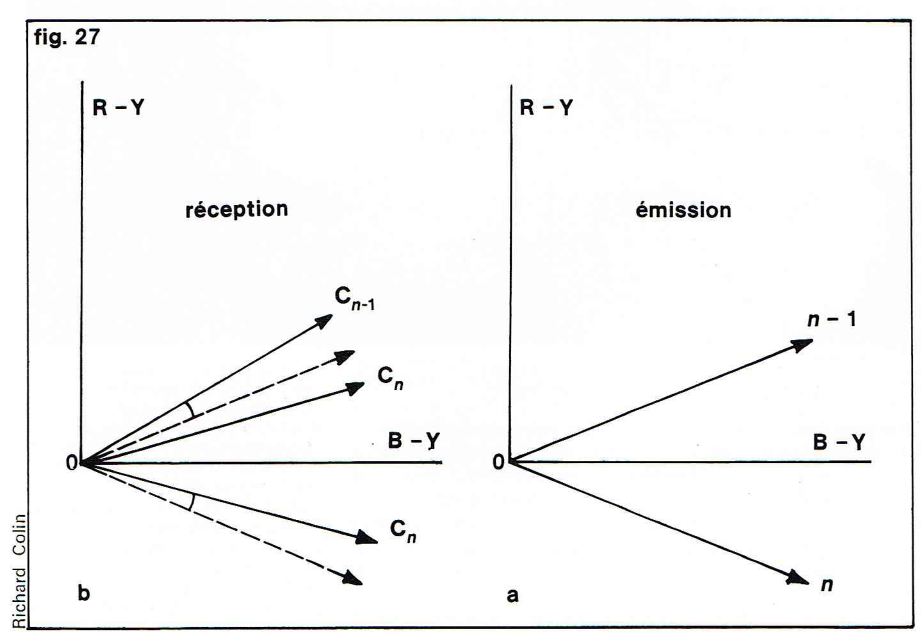
Ce phénomène étant rédhibitoire, les Européens, à la veille de choisir un procédé couleurs, se sont tournés vers d'autres solutions.

En 1958, Henri de France publia les détails d'un système d'émission évitant les problèmes liés à la grande sensibilité de phase. C'est, bien sûr, le procédé SECAM qui venait d'être inventé. Le procédé PAL lui est postérieur, mais, comme il se rapproche du NTSC, décrivons-le maintenant.

### *Le procédé PAL*

Il consiste en une amélioration du procédé NTSC destinée principalement à supprimer sa sensibilité aux déphasages. D'abord, il faut souligner que le PAL transmet comme signaux de chrominance les différences R-Y et B-Y. La valeur de ces composantes à un instant donné fixe le vecteur représentatif dans le plan de chrominance. Si l'on suppose que, d'une ligne à la suivante, ce vecteur varie très peu pour deux points l'un en dessous de l'autre, on peut utiliser une comparaison entre ces deux lignes pour s'assurer qu'il ne s'est pas introduit une déformation trop importante de l'information de couleur. On procède donc de la manière suivante : à l'émission, le signe de la composante R-Y est changé à chaque ligne, et à la réception, on prend, après démodulation, pour composante R-Y du vecteur de chrominance d'une ligne, la moyenne du signal $(R\text{-}Y)_n$ qui arrive pour cette ligne *n* et du signal $(R\text{-}Y)_{n-1}$ qui est arrivé pour la ligne précédente. Comme ils ont été émis en opposition de phase, c'est-à-dire inversés l'un par rapport à l'autre, les déphasages intempestifs s'annulent.

▼ ***Figure 27** : vecteurs représentant la couleur des lignes n — 1 et n dans le plan de chrominance ; a, à l'émission ; b, à la réception ; dans ce cas, la composition des vecteurs des deux lignes permet de s'affranchir des déphasages éventuels.*




La *figure* 27 montre comment les vecteurs représentant la couleur sont positionnés dans le plan de chrominance, pour deux lignes *n* — 1 et *n* successives. La seconde partie du graphique représente ce qui se passe à la réception, en supposant que c'est la composante $(R\text{-}Y)_n$ qui a été inversée à l'émission. On reçoit $C_{n-1}$ et $C_n$ ; après inversion de la composante R-Y de ce dernier, on en fait la moyenne avec $C_{n-1}$. Le déphasage, qui a pu modifier, au cours de la transmission, la position de $C_n$ par rapport à $E_n$, affecte aussi très vraisemblablement $C_{n-1}$. L'inversion de composante change aussi le signe de ce déphasage, et la moyenne effectuée compense cette distorsion.

Tout cela complique les circuits aussi bien à l'émission qu'à la réception, bien que l'incidence économique soit surtout sensible pour cette dernière. Il faut, en effet, conserver en mémoire pendant la durée d'une ligne le signal de chrominance pour pouvoir le composer avec celui de la ligne suivante. Il faut aussi trouver le moyen de mettre en phase à la réception, par rapport à l'émission, le commutateur qui doit inverser, une ligne sur deux, la composante R-Y du signal de chrominance. La première contrainte est satisfaite en utilisant une ligne à retard très précise de 64 µs en verre ; la seconde contrainte impose de modifier les salves qui sont transmises, comme dans le NTSC, à chaque ligne pendant le signal de suppression suivant le top de synchronisation ; les salves de deux lignes successives sont en effet déphasées de 180°.

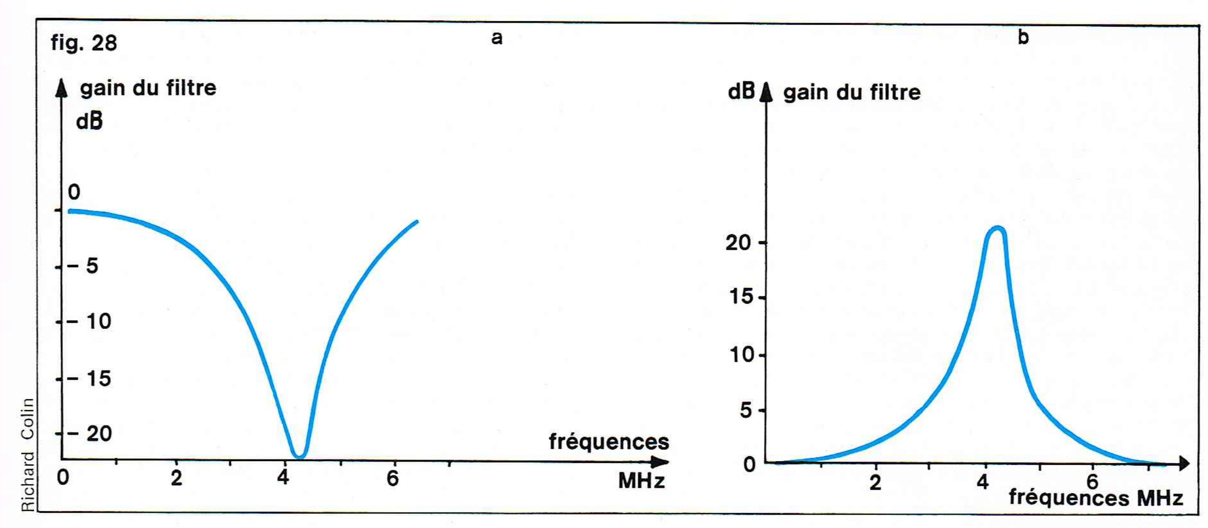
### *Le procédé SECAM*

L'idée de base de ce procédé est analogue à celle qui a servi dans la conception du PAL : la couleur est sensiblement la même pour deux lignes successives en deux points l'un au-dessus de l'autre. On en déduit que l'on peut donc se contenter de transmettre un seul signal de chrominance par ligne ; le second, qui reste bien entendu nécessaire pour redonner une image colorée avec le signal de luminance, est celui de la ligne précédente. Par exemple, à la ligne *n*, l'émetteur envoie d'une part le signal de luminance et d'autre part le signal de chrominance R-Y. A la réception, si l'on ne dispose que de ces deux informations, il est impossible de reconstituer une image colorée, puisqu'il manque le signal B-Y. En se fondant sur la remarque du début de ce paragraphe, on pallie cette absence en utilisant le signal B-Y de la ligne *n* — 1. Cela suppose évidemment que l'on a mis ce signal en mémoire pendant la durée d'une ligne. On emploie pour ce faire une ligne à retard de 64 µs, de manière un peu analogue à ce qui est fait dans le procédé PAL. On change aussi d'une ligne à l'autre le signal de chrominance transmis, si bien que, dans notre exemple, on transmettra le signal B-Y à la ligne *n* + 1, et pour reconstituer la couleur de cette ligne à la réception, on utilisera le signal R-Y qui a été transmis à la ligne *n*. Les signaux R-Y et B-Y sont donc transmis séparément et séquentiellement. La définition verticale de la chrominance est deux fois plus faible que si R-Y et B-Y étaient émis simultanément ; mais cela n'entraîne aucune baisse de qualité de l'image colorée, en raison de la faible largeur de bande dont disposent, de toute manière, les signaux de chrominance.

Plusieurs versions du système SECAM ont été mises au point, chacune présentant par rapport à l'autre une amélioration, du point de vue de la compatibilité essentiellement. Les normes employées actuellement par les chaînes de télévision françaises sont celles de la version dite « SECAM IIIb ». Le principe de base du fonctionnement reste celui que l'on a décrit. S'ajoutent un certain nombre de caractéristiques de détail que nous allons voir rapidement.

Le canal de télévision en couleurs a exactement la même largeur qu'en noir et blanc. Le spectre des signaux de couleurs vient donc se superposer à celui du signal de luminance commun au noir et blanc et à la couleur. Pour ne pas perturber la réception en noir et blanc des images émises en couleurs, il faut respecter certains impératifs en ce qui concerne l'amplitude des signaux de chrominance et la fréquence de leur sous-porteuse.

La fréquence de la sous-porteuse de chrominance doit faire l'objet d'un choix soigné, car elle est, ici, modulée en fréquence par les signaux de chrominance, et, par conséquent, en cas de réception en noir et blanc, elle peut perturber la formation de l'image par le signal de luminance seul. On constate, en effet, en observant le spectre, c'est-à-dire la composition du signal pour chaque fré-




◀ *Figure 28 : courbes de réponses de deux types de filtres servant au traitement des signaux de chrominance dans le procédé SECAM ; a, filtre en anticloche ou en trappe utilisé à l'émission ; b, filtre en cloche utilisé à la réception.*

quence, qu'une modulation de fréquence conserve la porteuse en lui donnant une amplitude relative qui dépend du taux de modulation. La fréquence porteuse existe donc pratiquement toujours dans le spectre. Pour éviter qu'elle n'ait une influence visible sur l'image, on l'affaiblit volontairement à l'émission en faisant passer les signaux de chrominance dans un filtre réjecteur, ou « trappe », destiné à diminuer l'amplitude de la sous-porteuse d'un facteur 10 environ. A la réception, pour retrouver des signaux de chrominance corrects, on leur fait subir un traitement inverse qui avantage les fréquences voisines de la sous-porteuse avec un filtre en cloche dont la réponse est représentée sur la *figure* 28b qui montre la raison de cette appellation. La *figure* 28a représente le filtre « trappe » utilisé à l'émission et que les techniciens appellent aussi « anticloche », puisque ces deux réponses doivent correspondre exactement pour qu'à la réception, avant de traiter les signaux de chrominance, ceux-ci aient des amplitudes relatives identiques à ce qu'elles étaient à l'émission.

Ce n'est cependant pas le seul traitement que l'on fasse subir aux signaux de chrominance. En effet, les chrominances R-Y et B-Y sont telles que leurs amplitudes deviennent plus faibles pour les fréquences élevées, c'est-à-dire que les fins détails de l'image colorée sont moins saturés que les plus grandes surfaces, et ce sont les fins détails qui conduisent aux plus hautes fréquences de ces signaux. Si on les transmettait tels quels, on exposerait cette partie du spectre à une grande influence des parasites extérieurs. C'est la raison pour laquelle on procède à une « pré-accentuation », qui consiste à augmenter délibérément l'amplitude des signaux de couleurs R-Y et B-Y en fonction de leur fréquence, et cela avant de leur faire moduler en fréquence la sous-porteuse de chrominance. Cette manipulation a pour but de rendre moins sensibles aux aléas de la transmission les signaux de chrominance ; on procède à la réception, après démodulation, à une désaccentuation qui redonne au spectre des signaux de couleurs sa forme originelle.

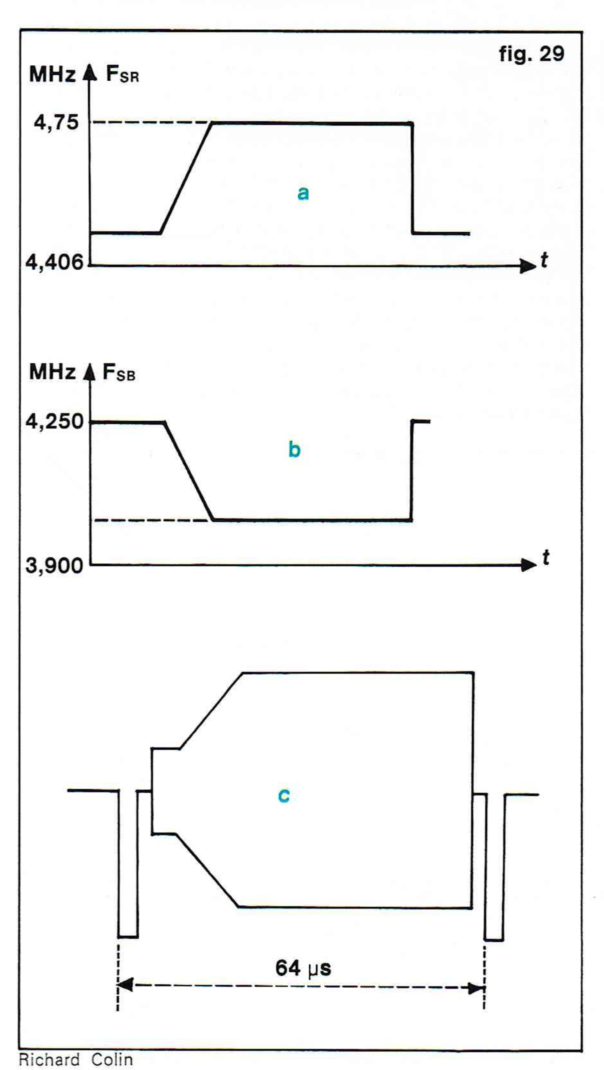
Nous avons, jusqu'ici, parlé de la sous-porteuse de chrominance. En fait, dans le procédé SECAM IIIb, on utilise deux sous-porteuses de fréquences légèrement décalées pour transmettre chaque signal de chrominance. La sous-porteuse $F_{SR}$, qui est modulée par R-Y, est à 282 fois la fréquence de balayage des lignes, soit

$$282 \times 15\,625 = 4{,}406 \text{ MHz},$$

et celle de $F_{SB}$, qui est modulée par B-Y, à 272 fois, soit 4,250 MHz.

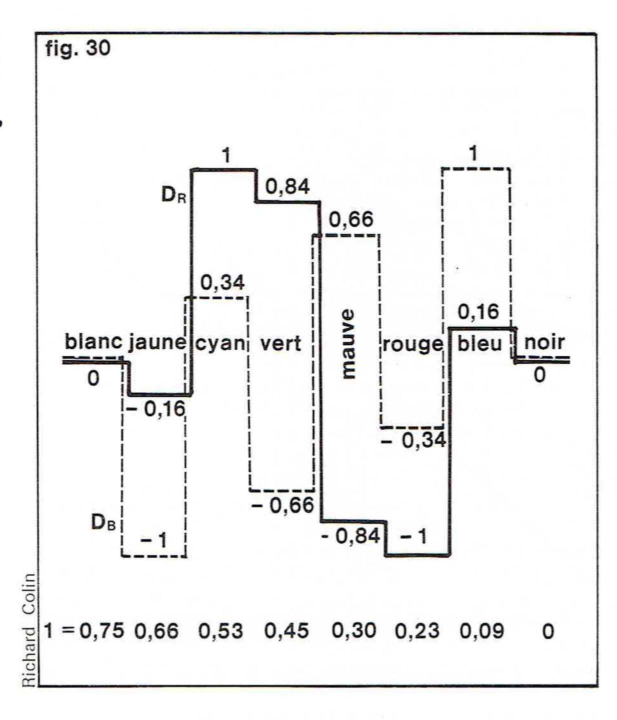
De plus, afin de diminuer le plus possible l'influence des sous-porteuses sur le signal de luminance, on inverse la phase des signaux de chrominance toutes les deux lignes d'une même trame et toutes les quatre trames pour une ligne de même numéro.

Il faut, par ailleurs, commander à la fréquence des lignes, et dans le sens convenable, par un double commutateur électronique qui aiguillera convenablement le signal de chrominance qui est transmis pour chaque ligne. Il aiguillera simultanément le signal issu de la ligne à retard vers l'autre entrée du décodeur des chrominances. Pour que ce commutateur travaille donc en phase et n'inverse pas les signaux rouge et bleu, ce qui serait évidemment catastrophique pour l'image, on envoie des signaux d'identification pendant 9 lignes de la durée de suppression de trame (se reporter à la description des signaux de synchronisation donnée pour le noir et blanc). Ces signaux d'identification sont composés de salves où la fréquence alternativement croît à partir de $F_{SR}$ pour identifier le signal R-Y, et décroît à partir de $F_{SB}$ pour identifier B-Y comme le montre la *figure* 29. En outre, les salves sont produites pendant le palier de suppression de ligne précédant le début de chaque ligne : une ligne pendant laquelle on transmet effectivement R-Y est précédée d'une salve sur $F_{SR}$, de même avec B-Y et $F_{SB}$.




◀ *Figure 29 : signaux d'identification du procédé SECAM de transmission de l'image couleur ; a et b, signaux modulateurs autour des fréquences des sous-porteuses $F_{SR}$ et $F_{SB}$ ; c, signal vidéo résultant de chrominance.*

▶ *Figure 30 : les signaux de mire du procédé SECAM;* $D_R = -1{,}9\ (R - Y)$; $D_B = +1{,}5\ (B - Y)$.

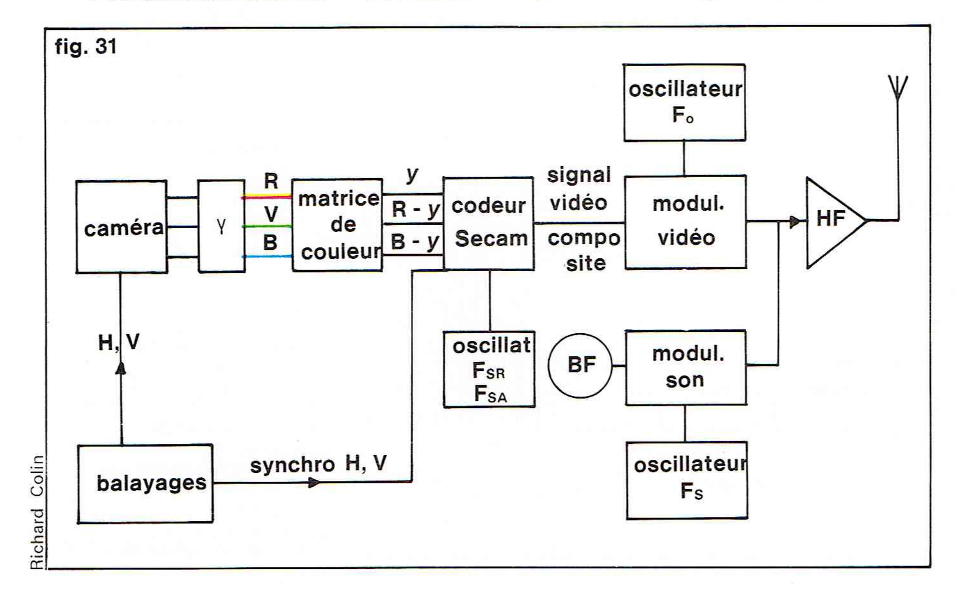



### *Mire de couleurs*

A certaines heures, en dehors des émissions de programmes, l'usager peut constater l'apparition sur son écran de bandes colorées successivement grise, jaune, cyan, verte, mauve, rouge, bleue et noire; il s'agit d'une mire de couleurs dont les signaux sont très bien calibrés. Elle est destinée aux constructeurs et aux dépanneurs, qui peuvent, pendant ce temps, effectuer des réglages sur les téléviseurs pour que la réception se fasse de manière optimale. La *figure* 30 montre les signaux de chrominance, avec des indications sur leur amplitude relative pour chaque bande colorée transmise. En dessous, on a porté les valeurs, corrigées du gamma, pour chaque composante R, V, B et pour la luminance Y.

Pour résumer tout ce que nous venons de voir à propos du procédé SECAM, établissons un schéma des dispositifs utilisés à l'émission, comme sur la *figure* 31. La caméra de prise de vues fournit trois signaux R, V, B qui subissent, pour commencer, la correction de gamma ($\gamma$ sur le schéma). Un générateur B de signaux de balayage H et V commande à la fois la caméra et le codeur SECAM. Un ensemble de circuits linéaires permet de composer les signaux R, V, B pour obtenir les signaux de luminance Y et de chrominance R-Y et B-Y. Le codeur SECAM a pour rôle d'ajouter au signal de luminance Y les tops de synchronisation et les salves des signaux d'identification.

▼ *Figure 31 : schéma synoptique d'un émetteur SECAM.*



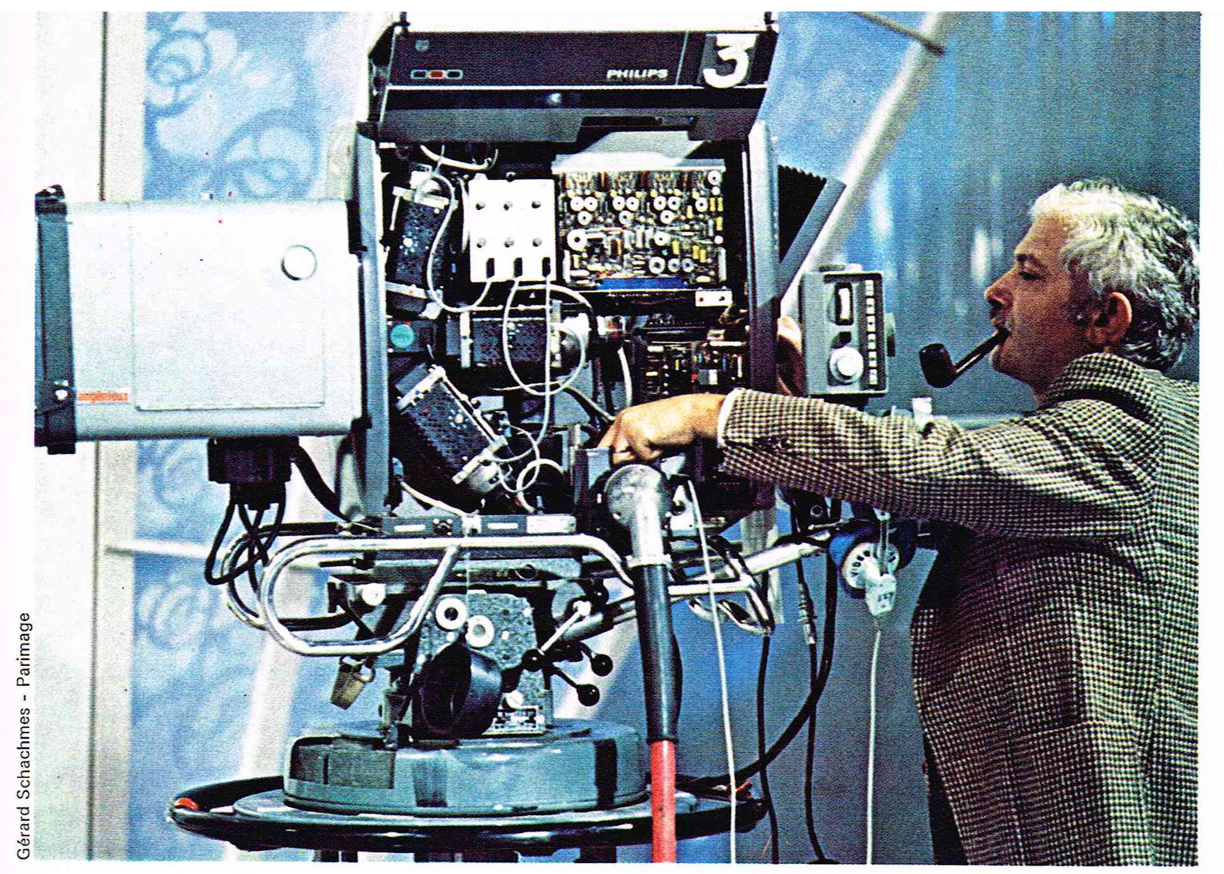

A partir de deux oscillateurs délivrant les sous-porteuses $F_{SR}$ et $F_{SB}$, il effectue leur modulation en fréquence par R-Y et B-Y tour à tour. Le signal vidéo composite sortant du codeur est donc composé du signal de luminance avec ses tops de synchro, les signaux d'identification et les salves, et d'une sous-porteuse modulée en fréquence. Il reste à transmettre ce signal vidéo composite; comme pour le signal noir et blanc, on module en amplitude une porteuse HF vidéo $F_v$ et on ajoute à la tension ainsi obtenue une autre porteuse $F_s$ pour transmettre le son.

Un schéma détaillé du codeur SECAM est donné sur la *figure* 32. Un filtre $F_1$, placé après le commutateur R-Y, B-Y, limite la bande passante de ces signaux à 2 MHz. Le filtre $F_3$ préaccentue les fréquences élevées pour les raisons que nous avons vues auparavant; suit un limiteur d'amplitude destiné à éviter de moduler trop profondément la sous-porteuse. Après le modulateur en fréquence qui reçoit tour à tour les deux sous-porteuses en synchronisme avec la commutation R-Y/B-Y, s'interpose le filtre anticloche. Puis intervient une modulation auxiliaire d'amplitude par le signal de luminance destiné à compenser les effets perturbateurs d'un signal de luminance très fort pour des fréquences voisines de celles des sous-porteuses. Cette modulation d'amplitude n'intervient d'ailleurs qu'au voisinage de ces fréquences; c'est la raison pour laquelle on a interposé un filtre $F_2$ sur le signal de luminance avant la détection qui doit fournir la tension de modulation. Enfin, pour compenser le retard pris par les signaux de chrominance à la traversée de tous ces circuits, avant de leur superposer le signal de luminance, on le retarde d'une quantité égale ($\delta$). On obtient de la sorte le signal vidéo composite qui nous ramène au schéma précédent.

Nous pouvons de la même manière décrire le schéma du décodeur donné sur la *figure* 33. Le récepteur couleurs comprend tous les circuits d'un récepteur noir et blanc et, en plus des circuits du tube trichrome, bien sûr, les circuits destinés à retarder les signaux de couleur R, V, B, qui seront appliqués aux trois cathodes du tube. Ces derniers circuits constituent le décodeur dont l'entrée reçoit le signal vidéo composite issu de la détection AM après amplification à moyenne fréquence. Un filtre $F_1$ débarrasse le signal vidéo composite des sous-porteuses et des signaux de chrominance. Il reste donc le signal de luminance que l'on retarde légèrement avant de l'envoyer dans la matrice de restitution des signaux R, V, B. Un autre filtre $F_2$ isole au contraire les sous-porteuses modulées en fréquence qui, après avoir traversé le filtre en cloche, sont appliquées à un limiteur d'amplitude. Ce signal de couleur attaque ensuite, soit directement, soit après avoir traversé la ligne à retard de 64 $\mu$s, le commutateur qui doit effectuer le tri entre les signaux de chrominance R-Y et B-Y. Le commutateur est commandé par une bascule dont les états sont imposés par un circuit qui a identifié les salves et qui reçoit les signaux de synchronisation. Après le commutateur, les deux signaux R-Y et B-Y sont extraits des sous-porteuses modulées par deux discriminateurs. On procède à la désaccentuation pour redonner aux signaux de chrominance leur amplitude réelle. Des filtres $F_4$ passe-bas éliminent toute présence de résidus HF, et les signaux arrivent à la matrice. La matrice reçoit donc les signaux Y et R-Y, B-Y, et en donne les trois composantes R, V, B pour l'attaque des cathodes d'un tube autoconvergent. Dans le cas des anciens tubes trichromes à canons en $\Delta$, la matrice fournissait R-Y, B-Y et V-Y que l'on appliquait aux cathodes, le signal de luminance attaquant directement le wehnelt; dans ce cas, par conséquent, c'était le tube lui-même qui effectuait la dernière partie du décodage.

## *Les caméras de prise de vues en couleurs*

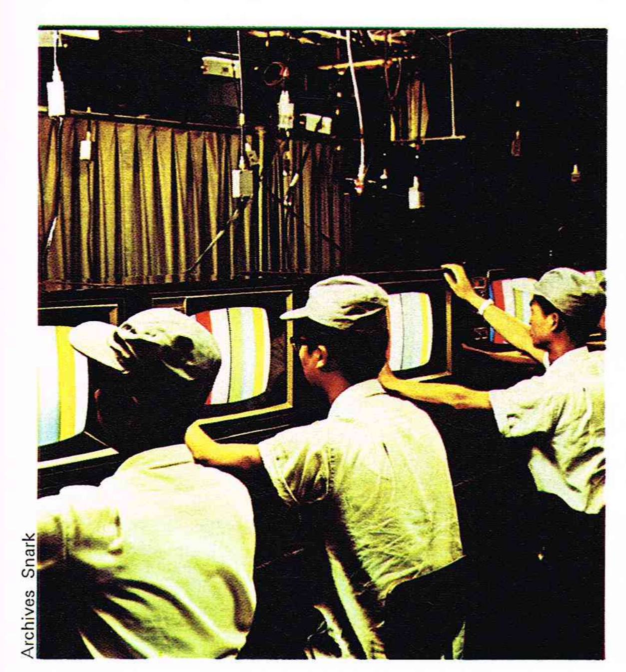
Elles fonctionnent indépendamment du procédé qui sera employé pour la transmission et délivrent trois signaux R, V, B, plus rarement quatre : R, V, B et un signal Y de luminance direct. Les tubes photosensibles employés sont des vidicons ou des plumbicons, ces derniers ayant été spécialement développés pour la couleur. On trouve, dans les revues spécialisées ou dans les dépliants publicitaires des fabricants de matériel de prise de vues, des tubes photosensibles, aux noms plus ou moins exotiques, qui présentent quelques améliorations par rapport aux précédents et qui ne sont pas encore d'un emploi aussi répandu.



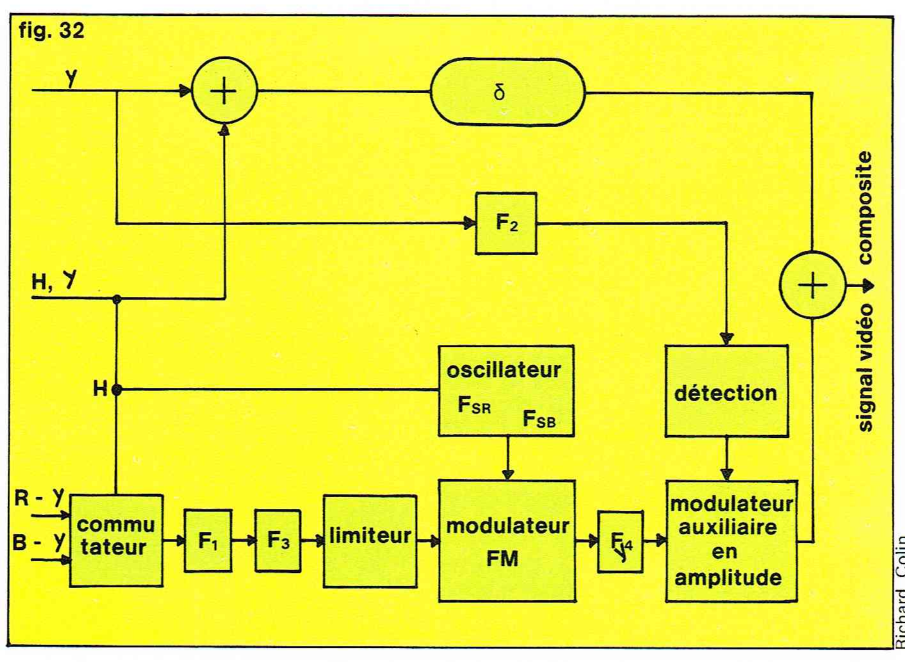

Gérard Schachmes - Parimage

◀ *Réglage d'une caméra de télévision.*

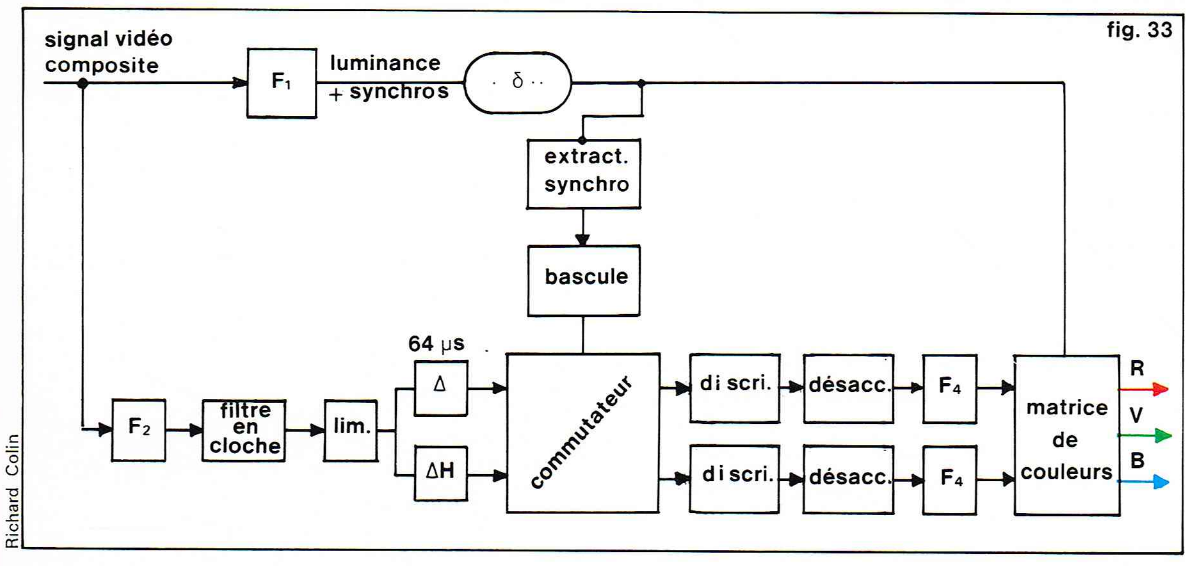
▼ *A gauche, réglage de postes de télévision en couleurs, au Japon ; les bandes colorées qui apparaissent sur l'écran sont des mires de couleurs destinées aux constructeurs et aux dépanneurs qui peuvent ainsi effectuer des réglages. A droite, figure 32 : schéma synoptique du codeur SECAM.*



Archives Snark

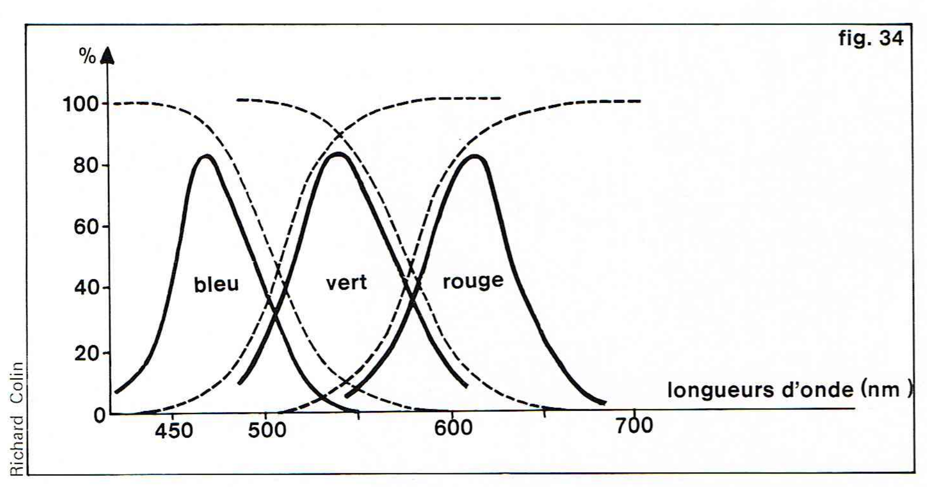



Richard Colin




Richard Colin

◀ *Figure 33 : schéma synoptique du décodeur SECAM.*



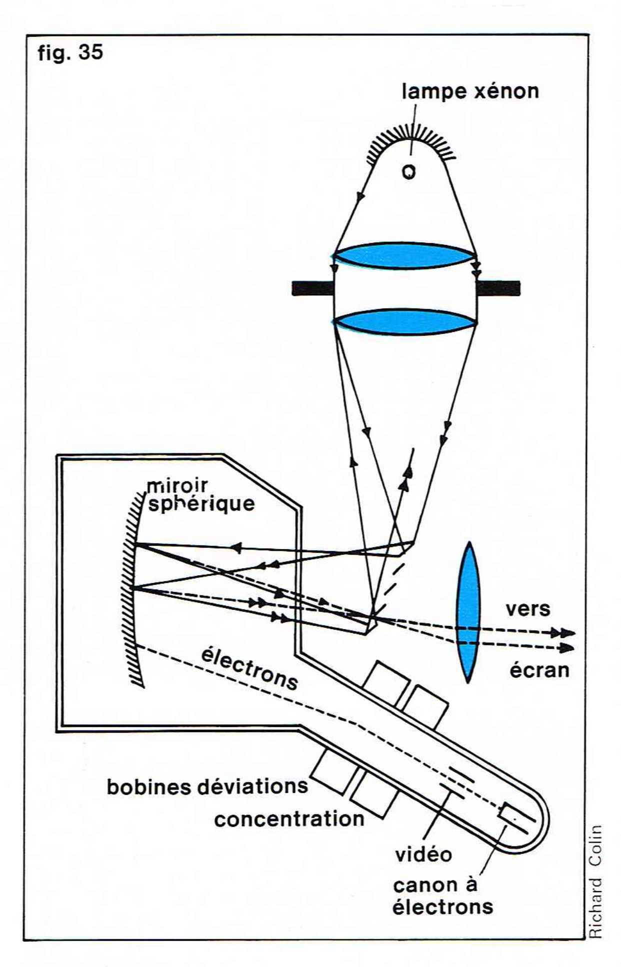




*Figure 34 : la conjugaison de plusieurs miroirs dichroïques permet d'isoler trois groupes de longueurs d'onde correspondant aux trois primaires rouge, vert et bleu. Figure 35 : schéma de principe de l'Eidophore, appareil permettant la projection d'images télévisées sur un grand écran (d'après R. Guillien, la Télévision en couleurs, collection Que Sais-je? Presses Universitaires de France).*

Comme on ne dispose pas de tubes de prise de vues dont les courbes de sensibilité chromatique correspondent bien aux trois composantes R, V, B avec lesquelles on a choisi de travailler, la séparation des couleurs doit être faite avant que la lumière vienne impressionner la surface photoconductrice. Plusieurs moyens ont été employés; le plus courant semble être un assemblage de miroirs dichroïques. Un miroir dichroïque réfléchit la lumière en proportion plus ou moins grande suivant sa longueur d'onde ; les longueurs d'onde qu'il ne réfléchit pas, il les transmet : tout se passe donc comme s'il était transparent pour certaines couleurs et réfléchissant pour les autres. La *figure* 34 montre comment, en conjuguant les réflexions et les transmissions de miroirs dichroïques accordés sur certaines couleurs, on peut isoler trois parties du spectre visible centrées autour des couleurs R, V, B qui nous intéressent. Disposés judicieusement, ces miroirs permettront alors d'aiguiller sur trois tubes de prise de vues les composantes chromatiques d'une image colorée. Ce système de répartition de la lumière n'a pas un coefficient de transmission de 100 %, c'est-à-dire que, même pour une longueur d'onde qui traverse avec le minimum d'atténuation l'ensemble des miroirs avant de frapper le tube analyseur, le coefficient de transmission n'est que de l'ordre de 80 %. En gros, donc, chaque tube ne reçoit guère que 12 à 15 % de la lumière totale que peut renvoyer une scène à téléviser, ce qui impose des valeurs d'éclairement très fortes lorsque l'on emploie la couleur. En pratique, on emploie un éclairement extrêmement vif de 4 000 à 6 000 lux, de 6 à 8 fois plus élevé que ce qui est nécessaire pour téléviser en noir et blanc.

Les trois tubes analysant simultanément la même image sont attaqués par les mêmes signaux de balayage et de synchronisation. Il est nécessaire, bien évidemment, qu'à chaque instant, la tension qu'ils fournissent se rapporte absolument au même point de l'image. Cela impose une construction mécanique robuste des caméras et une électronique soignée de manière que l'analyse d'un point de l'image soit bien effectuée au même instant par les trois tubes photosensibles.

## Projection sur grand écran

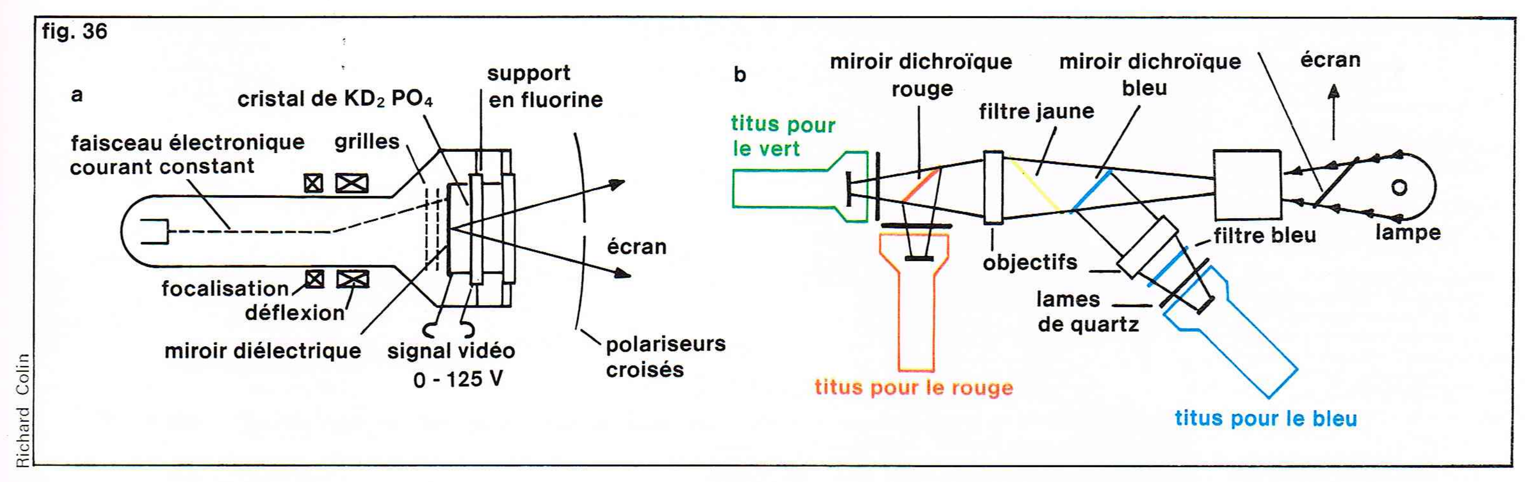
Pour permettre à une assemblée assez nombreuse, dépassant une cinquantaine de personnes, de regarder une image de télévision, plusieurs moyens sont possibles. L'utilisation de téléviseurs ordinaires n'est guère pratique, car elle impose une installation dispersée et ne permet pas de placer chaque spectateur dans des conditions idéales d'observation. Un moyen plus convaincant est la réalisation d'une projection sur grand écran. Malheureusement, on se heurte là à une très grosse difficulté relative à la faible luminosité des tubes générateurs qui donnent des images pouvant difficilement être projetées avec un fort grossissement. Il existe néanmoins des systèmes particuliers qui permettent une projection dans des conditions satisfaisantes. Ce sont habituellement des appareils extrêmement chers réservés à un usage commercial, bien qu'il soit apparu sur le marché français un projecteur grand public à un prix raisonnable, compte tenu du genre d'utilisations auxquelles il est destiné.

### L'Eidophore

Ce procédé, inventé en 1943 par le professeur Fischer en Suisse, a été mis au point par F. Baumann et ses collaborateurs il y a 25 ans. Il est actuellement fabriqué et vendu par Philips.

On n'utilise pas ici la lumière provenant d'un tube cathodique générateur de l'image, mais on module la lumière provenant d'une source très puissante. Cette modulation, commandée par le signal vidéo, se fait au moyen d'un film d'huile déposé à la surface d'un miroir sphérique. Celui-ci est éclairé par la lampe à travers un miroir plan à barres, comme le montre la *figure* 35, de telle manière que, si le film d'huile a une épaisseur uniforme, toute la lumière reste enfermée dans le dispositif. Si, par contre, le film d'huile est déformé légèrement en un ou plusieurs endroits de sa surface, la lumière que le miroir sphérique réfléchit est déviée, et elle passe à travers le miroir à barres ; reprise par un objectif, elle peut servir à former une image de la surface du film d'huile sur un écran. Il faut donc déformer le film d'huile suivant l'image que l'on veut projeter. On y arrive en bombardant le film d'huile avec un pinceau d'électrons qui crée une déformation d'autant plus forte que le pinceau est plus intense. Comme pour un tube-image ordinaire, on se sert d'un faisceau d'électrons dont l'intensité est modulée par le signal vidéo et auquel on fait balayer la surface du film d'huile comme s'il était un écran de tube-image. Avec une lampe à arc au xénon de 2,5 kW, on obtient une intensité lumineuse de 4 000 lumens permettant d'effectuer des projections sur un écran de très grandes dimensions (9,5 m × 12,5 m) avec un éclairement suffisant.

Ce dispositif, l'Eidophore, utilisé depuis longtemps en noir et blanc, a été adapté à la couleur. On utilise pour cela trois systèmes identiques, chacun d'eux étant chargé de projeter une des trois composantes colorées de l'image. Cela ne va pas sans créer des difficultés supplémentaires, et très peu de ces dispositifs sont en service dans le monde. L'un d'eux est installé au palais des Congrès de la porte Maillot à Paris. La lampe utilisée a une puissance de 6 500 W et permet la projection sur un écran d'environ 110 $m^2$.




▲ ***Figure 36 :***
***le tube TITUS ;***
***a, schéma de principe ;***
***b, principe de la projection de l'image couleurs (d'après E. Lémery,*** **Projection en couleurs sur grand écran, le Haut-Parleur, n° 1550,** ***p. 41).***

## *Le tube TITUS*

Le tube TITUS, ou tube-image à transparence variable spatio-temporelle, a un principe de fonctionnement très différent. Il modifie la transmission d'une lumière de forte intensité en modifiant sa polarisation suivant le schéma de la *figure* 36. La lumière d'une source de forte intensité traverse successivement un polariseur fixe, un cristal électro-optique jouant le rôle de polariseur variable, et un analyseur dont l'axe est croisé avec celui du polariseur fixe. En l'absence de tension appliquée à la cellule électro-optique constituée d'un cristal de $KD_2PO_4$, aucune lumière ne passe, puisque analyseur et polariseur sont croisés. La polarisation supplémentaire introduite par le cristal modifie cet état de fait, et on utilise la lumière transmise pour projeter une image. L'image est donc formée à partir de l'état de polarisation de chaque point ou de chaque volume élémentaire du cristal, cet état de polarisation dépendant de la tension appliquée entre les deux faces du cristal. Une de ses faces porte une électrode transparente portée à une tension continue, l'autre face sert de support à un miroir diélectrique qui renvoie la lumière reçue vers l'analyseur optique et qui est lui-même chargé par un faisceau d'électrons proportionnellement à son intensité. Le faisceau d'électrons balaie le miroir suivant un procédé familier et lui impose donc en chaque point une distribution de tension représentant les points brillants et obscurs de l'image.

Bien qu'environ deux fois moins lumineux que l'Eidophore, ce dispositif présente sur lui beaucoup d'avantages : il est en effet beaucoup plus simple à construire et à faire fonctionner.

Étudié et mis au point par le LEP (Laboratoire d'électronique physique) qui fait partie du groupe Philips, le tube TITUS n'est encore qu'un prototype qui fonctionne en public à titre expérimental à l'Empire, théâtre audiovisuel de la SFP, avenue de Wagram.

## *Les projecteurs grand public*

Plusieurs constructeurs se sont penchés sur ce problème en visant des dimensions d'écran plus réduites convenant pour un public de 15 à 25 personnes. Le premier chronologiquement a été Sony. En utilisant son tube-image à grille, le Trinitron, qui a une luminosité bien plus élevée que le tube à masque, Sony a construit et vendu, vers 1971, un projecteur d'images en couleurs. Outre que sa luminosité restait faible, la projection nécessitait d'être faite dans le noir complet ; il n'a jamais été développé pour le procédé SECAM, il n'a donc pas été commercialisé en France.

Le projecteur Advent, soutenu par un gros effort publicitaire, est apparu sur le marché français en 1977. Il donne des images de dimensions intéressantes (1,4 m × 1,86 m), sur un écran adapté spécialement au projecteur, sa forme étant étudiée pour corriger certaines aberrations du système optique de projection. L'image est obtenue grâce à trois tubes spécialement mis au point et construits par Advent. Chaque tube comprend un canon à électrons bombardant une cible de dimensions réduites et recouverte de phosphore rouge, vert ou bleu. Cette cible se comporte comme la source d'un système optique incorporé au tube comprenant une optique de Schmidt et un objectif de sortie asphérique. Ce tube très astucieux présente un grand intérêt, sa définition est très élevée et il est incorporé à un ensemble dont l'encombrement est faible et tout à fait acceptable dans un salon, par exemple.

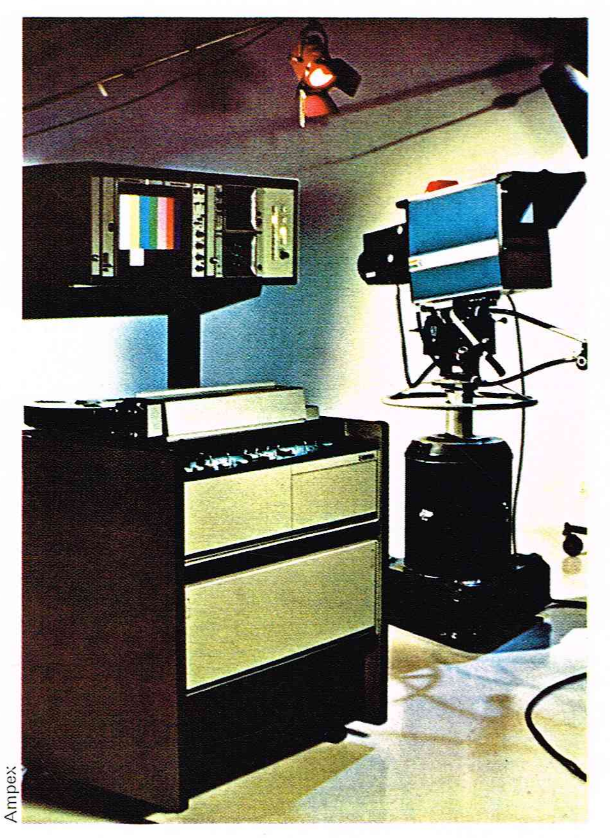
## *Les magnétoscopes*

La conservation des images en noir et blanc ou en couleurs a longtemps été l'apanage de la photographie ou du cinéma. Cependant, puisque la télévision avait réussi à donner un équivalent électrique de l'information contenue dans une image, il est tout naturellement venu à l'idée d'essayer de la conserver par un enregistrement magnétique, comme on le fait pour le son avec les magnétophones. Depuis les années 1950, moment où furent tentés les premiers enregistrements d'images sur support magnétique, la technique des magnétoscopes s'est beaucoup développée, jusqu'à concurrencer le cinéma en couleurs dans le domaine professionnel et le cinéma en noir et blanc pour le grand public. Son avantage considérable et essentiel sur le film est l'exploitation instantanée des images enregistrées ; en effet, un réembobinage rapide de la bande permet de la relire immédiatement et, par conséquent, de reproduire sans délai les scènes magnétoscopées. On évite ainsi la plus lourde sujétion du film classique qui est son passage au laboratoire pour le développement, qui impose un délai plus ou moins long avant que l'on puisse disposer des images. En contrepartie, la qualité de reproduction des images est encore, à l'heure actuelle, moins bonne pour le magnétoscope que pour le film sauf pour les équipements professionnels de studio, tels que ceux dont disposent les stations de télévision nationales qui sont extrêmement élaborés et donnent des résultats de très bonne qualité. Ce sont aussi des appareils de prix très élevé et qui ne sont évidemment pas transportables. Cela explique pourquoi la plupart des séquences que nous présente la télévision, celles du moins qui ont été tournées en extérieur ou loin du studio de production, sont encore reproduites à partir de films de cinéma.

Certaines stations régionales de FR 3 disposent, à titre expérimental, d'ensembles portables pour les reportages. Pratiquement, tout étant maintenant tourné en couleurs, cet équipement est, bien que portable, nettement plus lourd et plus encombrant qu'une caméra de cinéma. Il donne aussi, les téléspectateurs de ces régions peuvent s'en apercevoir, des images de moins bonne qualité à la transmission qu'un film diffusé au moyen du télécinéma. Son gros avantage est qu'il permet une transmission immédiate des images qui viennent d'être prises grâce à la possibilité de relecture de la bande magnétique.

Comment sont donc enregistrées les images sur la bande magnétique ? Les comparaisons que l'on peut faire avec le magnétophone sont extrêmement limitées, compte tenu des bandes de fréquence très différentes nécessitées par la représentation électrique d'un son et d'une image. Le seul point commun semble être que l'on utilise, dans les deux cas, pour mémoriser l'information, une bande magnétique, ayant des caractéristiques différentes toutefois, puisque la mémoire est un état magnétique différencié localement.

▶ *Le magnétoscope Ampex AVR-2 avec sa caméra; les équipements professionnels de studio tels que celui-ci sont extrêmement élaborés et donnent des résultats de bonne qualité, mais ne sont évidemment pas transportables.*



Ampex

▶ *Page ci-contre, en haut, figure 38 : déroulement de la bande magnétique* (a) *et mouvement relatif des têtes d'enregistrement* (b) *selon le procédé Ampex à quatre têtes (quadruplex)* [*d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio*]. *Figure 39 : enroulement* α *de la bande magnétique autour du tambour dans lequel tourne la tête d'enregistrement selon le procédé Toshiba; l'exploration de la bande magnétique s'effectue donc au moyen d'une seule tête vidéo tournante* (*d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio*).

La grande bande passante de fréquence nécessitée par l'analyse d'une image en télévision, représentée par le canal de la *figure* 8, impose des contraintes particulières à l'enregistrement magnétique. Puisqu'il faut agir localement sur la bande pour imposer des états magnétiques différents au cours du temps, la vitesse de la bande limite la fréquence maximale suivant la finesse avec laquelle on peut écrire ou lire sur elle. En clair, la largeur de l'entrefer de la tête d'enregistrement est liée à la fréquence maximale enregistrable et à la vitesse de défilement de la bande par la relation :

$$2\, e\, f_{\max} < v$$

Cette relation impose une vitesse de bande de 25 m/s pour une fréquence maximale de 5 MHz et une largeur d'entrefer de tête magnétique de 2,5 μm, ce qui est le plus fin que l'on fasse actuellement. Il est évidemment inconcevable de faire défiler la bande à cette vitesse en maintenant la tête d'enregistrement immobile, comme on peut le faire d'un magnétophone. La vitesse $v$ de la relation précédente est une vitesse relative, c'est-à-dire la vitesse de la bande par rapport à la tête. Puisque l'on ne veut pas faire défiler la bande aussi vite, on utilise un déplacement de la tête en face de la bande.

D'un autre côté, vers les fréquences basses, le rendement à la lecture chute régulièrement avec la fréquence; cela est dû au fait que la période du signal, et son empreinte sur la bande, devient grande par rapport à l'entrefer et, par conséquent, la tension induite, proportionnelle, suivant la loi de Lenz, aux variations inscrites sur la bande, diminue progressivement avec la fréquence. Pour s'affranchir de cette variation, on utilise une modulation de fréquence, c'est-à-dire que les signaux vidéo ne sont pas enregistrés en direct, mais qu'ils modulent en fréquence une porteuse à 5,5 MHz dont l'amplitude sature la bande magnétique. Cette saturation n'introduit pas de déformation du signal, puisque l'information est tout entière dans la fréquence et non dans l'amplitude dont la porteuse est inscrite sur la bande magnétique. De la sorte, la fréquence de repos, 5,5 MHz, correspond au niveau du noir du signal vidéo composite : l'excursion de fréquence maximale est de 1,3 MHz (fréquence modulée 5,5 + 1,3 = 6,8 MHz) et correspond au niveau du blanc. Le fond des tops de synchronisation amène la fréquence modulée à 5 MHz.

Si ce type de modulation convient bien aux signaux noir et blanc, l'enregistrement de la chrominance conduit à quelques difficultés, surtout pour les procédés NTSC et PAL d'ailleurs. L'enregistrement des signaux couleurs de ces deux procédés a conduit à développer une technique à modulation par intervalles d'impulsions. Il est ainsi possible d'enregistrer le signal vidéo composite avec sa ou ses sous-porteuses de couleurs pour tous les procédés NTSC, PAL ou SECAM avec un bon rapport signal sur bruit et une bande passante de 5 MHz, sans souffrir des erreurs géométriques inévitables de fonctionnement de la bande.

La première technique d'enregistrement sur magnétoscope a été mise au point par Ampex. Elle utilise des pistes transversales sur une bande magnétique de grande largeur : 2 pouces, soit 50,8 mm (à comparer avec la largeur de bande habituelle des magnétophones : un quart de pouce, soit 6,35 mm). La tête magnétique d'enregistrement passe devant la bande avec une grande vitesse, 42 m/s; pour ce faire, elle est fixée sur un disque tournant à 250 tours par seconde. Pour utiliser au mieux la surface de la bande magnétique, on s'arrange pour que, lorsque la tête quitte la bande, une autre tête commence à inscrire une autre piste à côté de la première. En effet, bien que le déplacement de la tête soit perpendiculaire à la bande, celle-ci se déplaçant à 38,1 m/s, la piste inscrite par la tête se trouve légèrement en biais, comme le montre la *figure* 37. Il y a ainsi quatre têtes d'enregistrement sur le disque tournant, si bien que, chaque tête créant une piste, il faut 20 pistes pour constituer une trame.

Le signal son fait l'objet d'un traitement séparé; il est enregistré comme dans un magnétophone, sur une piste réservée au bord de la bande et dans le sens du défilement, avec une tête d'enregistrement auxiliaire.

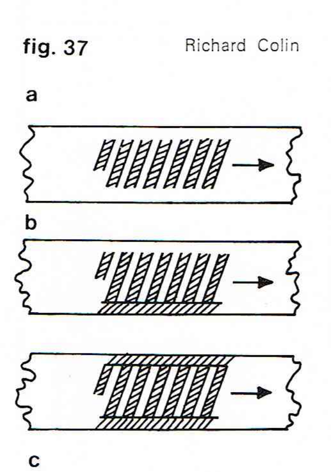
A l'enregistrement des signaux vidéo, les quatre têtes sont attaquées simultanément par les signaux modulés; la longueur d'une piste vidéo correspond à un peu plus d'un quart de tour du disque porte-têtes, si bien qu'il y a continuité et même recouvrement du message vidéo d'une piste à la suivante.

A la lecture, les choses sont moins simples, car, cette fois, le signal vient des têtes pour atteindre, par l'intermédiaire d'un amplificateur, le dispositif de démodulation; d'autre part, au mieux deux mais le plus souvent trois têtes ne sont pas sur la bande et, par conséquent, n'émettent pas de signal mais du bruit. Il faut donc commuter chaque tête quand elle arrive sur la bande pour la relier à un amplificateur et la déconnecter quand elle est sur le point de quitter le contact de la bande magnétique. Pour que ces transitions ne soient pas visibles à la reconstitution de l'image, on s'arrange pour que la commutation se fasse pendant le retour du balayage des lignes.

Il faut aussi qu'à la lecture, il y ait une bonne concordance entre la vitesse de rotation des têtes et la vitesse de

▲▶ *Ci-dessous, figure 37 : aspects d'une bande magnétique après passage devant les têtes d'enregistrement vidéo* (a), *devant la tête d'enregistrement de signaux basses fréquences* (b) *et devant la tête d'enregistrement des tops de synchronisation* (c) *(procédé Ampex)* [*d'après Ch. Dartevelle,* les Magnétoscopes. Théorie et Pratique, *Éditions Radio*]. *A droite, détail du magnétoscope VPR-1 de Ampex.*

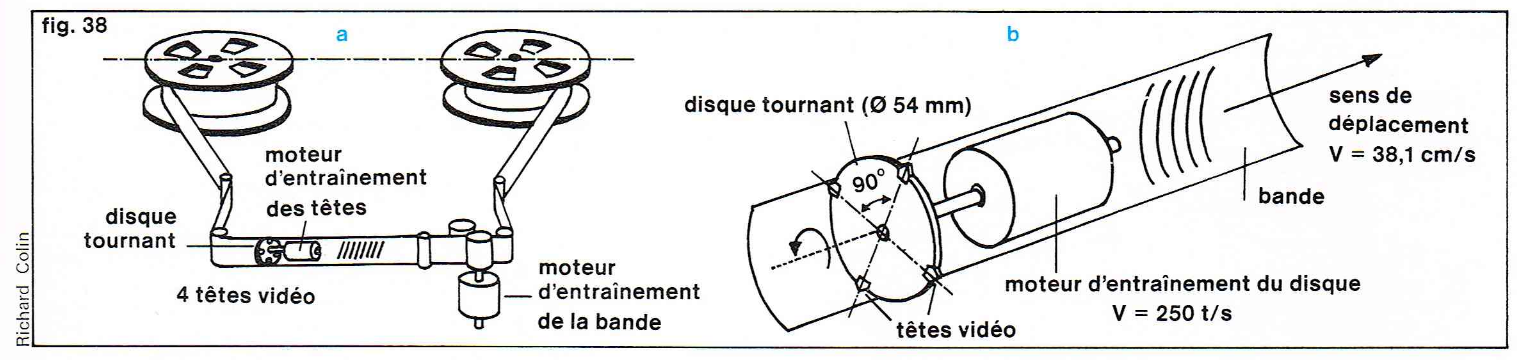
**fig. 37** Richard Colin



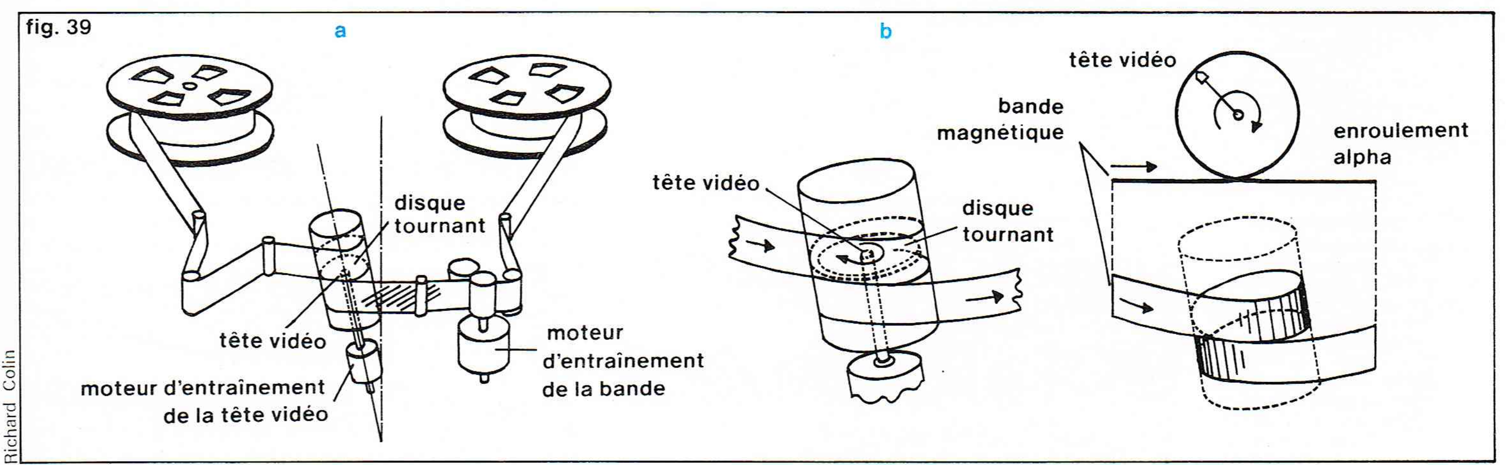




Ampex






défilement de la bande pour que les pistes soient rigoureusement positionnées sous les têtes au cours du défilement. Dans ce dessein, on prend la précaution, à l'enregistrement, de mettre sur une piste longitudinale, au bord de la bande, un signal de référence (ou de synchronisation) à 250 Hz piloté par la rotation du disque porte-têtes et suivant toutes les variations éventuelles de celui-ci. A la lecture, on relit le signal de référence, et on le compare constamment à la fréquence de rotation des têtes ; en cas d'écart, on agit sur le moteur de défilement de la bande de manière à ramener l'égalité des fréquences. De cette manière, les têtes de lecture, qui sont les mêmes que celles d'écriture (ou d'enregistrement), restent constamment, pendant tout le défilement de la bande, au contact des pistes enregistrées.

Les magnétoscopes répondant à la norme Ampex sont des appareils très lourds et très chers. On a cherché à mettre au point des modèles plus simples, donc de coût moins élevé et aussi d'un poids tel qu'ils deviennent transportables, voire portables. Ce résultat a été atteint en 1959 par les laboratoires Toshiba, sous la forme d'un magnétoscope à une seule tête qui ne quitte la bande qu'un court instant pendant sa rotation, ceci étant obtenu par une présentation tout à fait particulière de la bande devant la tête. Le système Toshiba utilise également une bande de deux pouces (50,8 mm) qui se déplace à la vitesse de 15 pouces par seconde (38,1 cm/s). Au lieu de défiler devant les têtes tournantes suivant une direction perpendiculaire au plan de rotation des têtes (comme dans la technique Ampex [*fig.* 38]), la bande s'enroule autour d'un cylindre creux dont l'axe fait un angle tel avec la bande qu'après un tour, elle est décalée dans son plan d'une distance exactement égale à sa largeur (*fig.* 39). Cet enroulement hélicoïdal autour du cylindre est aussi appelé « enroulement α ». La tête d'enregistrement tourne à l'intérieur du cylindre ; elle est en contact avec la bande par une fente ménagée dans le cylindre suivant une section droite, comme le montre la *figure* 39. La piste où se trouve inscrit le signal vidéo n'est donc plus transversale mais allongée en diagonale sur la bande. Chaque piste de vidéo mesure ainsi 72 mm et porte les informations d'une trame entière.

La rotation de la tête, qui se fait à une vitesse de 50 tours par seconde, est pilotée à l'enregistrement par le signal de synchronisation de trame du signal vidéo. Le fait d'inscrire une trame d'un seul coup présente un intérêt considérable par la possibilité que cela donne d'arrêter le défilement de la bande pour faire un « arrêt sur image », qu'il conviendrait mieux d'appeler « arrêt sur trame ». Il est même tout à fait possible, en ralentissant le défilement de la bande, de réaliser un « ralenti ». La bande porte encore sur ses bords la piste son d'une part et la piste de référence d'autre part.

L'enroulement α de la bande autour du cylindre représenterait une énorme surface de frottement s'il y avait contact. Pour l'éviter, on souffle de l'air par l'intérieur du cylindre, créant un véritable coussin d'air qui maintient la bande éloignée du cylindre.

En plus des possibilités de ralenti et d'arrêt sur image, le système Toshiba, bien plus simple que le système Ampex, permet l'enregistrement des signaux couleurs des

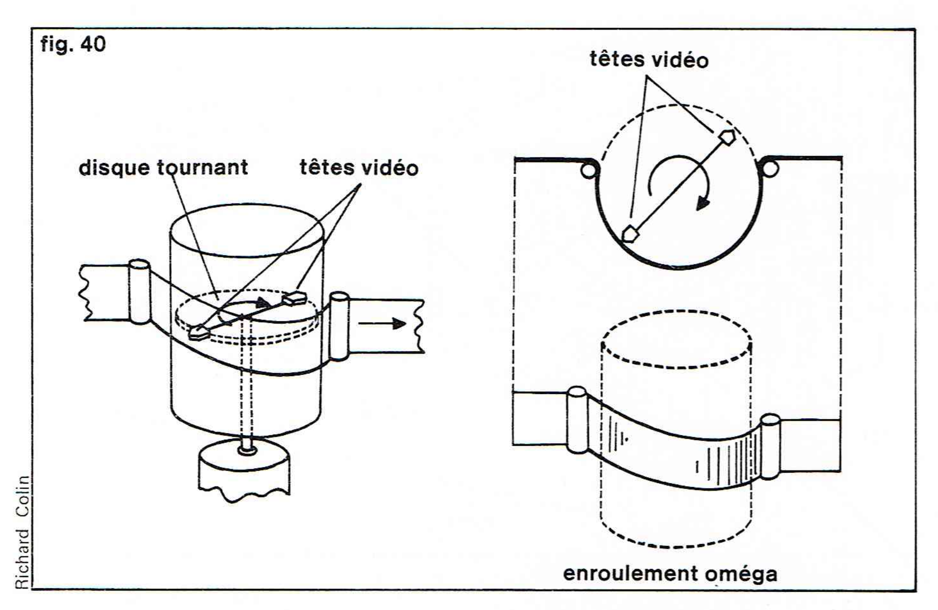
▼ *Une vue d'ensemble d'un studio vidéo de télévision ; les informations télévisées sont introduites dans les magnétoscopes pour une réutilisation ultérieure.*



semble que les images ne soient pas d'assez bonne qualité pour éveiller un intérêt autre que de curiosité.

Les bandes magnétiques utilisées sur les magnétoscopes demandent à être manipulées avec beaucoup de soin.

Pour éviter toute difficulté à l'utilisateur, les présentations en « cassette » se généralisent. Malheureusement, jusqu'à aujourd'hui, chaque marque a son modèle de cassette, non compatible avec celui des autres marques. Nous sommes encore dans une période de foisonnement pendant laquelle beaucoup d'essais sont faits qui tendent à comparer les différents modèles. Il est tout à fait vraisemblable que, dans un futur proche, les constructeurs s'orienteront vers une sorte d'accord visant à standardiser un peu la présentation et les normes d'utilisation des magnétoscopes à cassettes. La tendance actuelle est de retenir la cassette à bande 3/4 de pouce de Sony dont la gamme Umatic est très répandue pour les applications de studio semi-professionnelles, par exemple, et une cassette à bande 1/2 pouce pour les modèles portables.




▲ *Figure 40 : enroulement de la bande magnétique en 1/2 Ω dans le cas d'un enregistrement avec deux têtes (d'après Ch. Dartevelle,* **les Magnétoscopes. Théorie et Pratique,** *Éditions Radio).*

procédés NTSC, PAL ou SECAM avec beaucoup moins de problèmes, puisqu'il n'y a plus de commutation des têtes vidéo tournantes.

Tel qu'il vient d'être décrit, le système Toshiba ne permet pas encore de construire des magnétoscopes semi-professionnels, et, bien entendu, encore moins pour le grand public.

Cependant, certaines adaptations consistant à éviter les dispositifs chers de ce système ont vu le jour. Il s'agit principalement d'un changement du parcours de la bande qui ne s'enroule plus autour du cylindre mais ne fait qu'un demi-tour, donc sur 180° ; l'enroulement est dit en « 1/2 oméga » (Ω) [*fig.* 40]. Il y a cette fois deux têtes tournantes d'enregistrement et de lecture pour compenser le fait que la bande ne suit qu'un demi-tour du cylindre. Ces magnétoscopes utilisent des bandes moins larges ; les applications professionnelles demandent des bandes de 1 pouce (25,4 mm), et les applications grand public peuvent se faire avec des bandes de 1/2 pouce de large (12,7 mm).

Certains amateurs disposent, depuis quelques années, de magnétoscopes (certains avec bande de 1/4 de pouce) qui, associés à des caméras compactes, leur permettent d'enregistrer des images noir et blanc à un prix raisonnable, compte tenu de la technicité de ces produits. Des équipements couleurs ont fait une timide apparition, mais il

## *Autres systèmes de conservation de l'image de télévision : les vidéodisques*

Dans le dessein d'abaisser le coût de diffusion des programmes TV, on a étudié d'autres dispositifs que le magnétoscope, qui reste relativement cher pour le grand public et dont le support d'information, la bande magnétique, est onéreux.

Tous ces nouveaux systèmes font appel à un disque, tout à fait différent du microsillon classique, et sur lequel les images sont enregistrées suivant des techniques très différentes. Ils portent tous, néanmoins, le nom de vidéodisques.

Le plus proche du disque classique est le vidéodisque d'AEG-Telefunken-Teldec. Au lieu de 10 à 15 sillons par millimètre sur un disque sonore, le vidéodisque Teldec a 280 sillons par millimètre. Il est lu par un capteur piézoélectrique qui traduit les micro-ondulations de sa surface en un signal électrique. Sur le lecteur, le disque tourne à 1 500 tours/mn. Un vidéodisque Teldec de 21 cm de diamètre permet de conserver un programme d'une durée de 10 minutes. Ce système, qui est fabriqué depuis 1970, est commercialisé en Allemagne mais ne semble pas avoir un succès foudroyant. Il utilise pourtant la technologie bien connue et maîtrisée des disques sonores, c'est-à-dire un disque en chlorure de polyvinyl, ce qui est un gage de sûreté de fonctionnement. Mais le système de lecture mécanique frottant sur un disque tournant à grande vitesse provoque certainement une usure rapide du disque.




▶ *Prise de vues avec une caméra vidéo portable ; ce système destiné aux amateurs permet d'enregistrer des images en noir et blanc à des prix raisonnables ; les équipements pour des prises de vues en couleurs ne sont pas encore au point.*

Un système différent, utilisant un disque rigide, mais encore relativement proche des techniques classiques, est le vidéodisque RCA. Dans les 218 sillons par millimètre sont inscrites des fentes rectangulaires dont la largeur et la distance des unes aux autres représentent le signal vidéo. Toute la surface du disque est recouverte d'une très fine couche conductrice métallique, recouverte elle-même d'une couche homogène d'isolant. La lecture se fait en laissant glisser le long du sillon un saphir porteur d'une électrode métallique. Le condensateur formé par la couche métallique du disque et l'électrode du saphir présente une capacité variable suivant la dimension des fentes au-dessus desquelles passe le saphir (*fig.* 41). Bien que très faible ($3,5 \times 10^{-4}$ picofarad), cette variation de capacité suffit à déplacer la fréquence d'un oscillateur qui, détecté, redonne le signal vidéo. La vitesse de rotation du disque est de 450 tours/mn, et, comme le saphir frotte sur le disque, on évalue à 500 h sa durée de vie. Le disque peut être lu 500 fois environ ; chacune de ses deux faces fournit 30 mn de programme télévisuel.

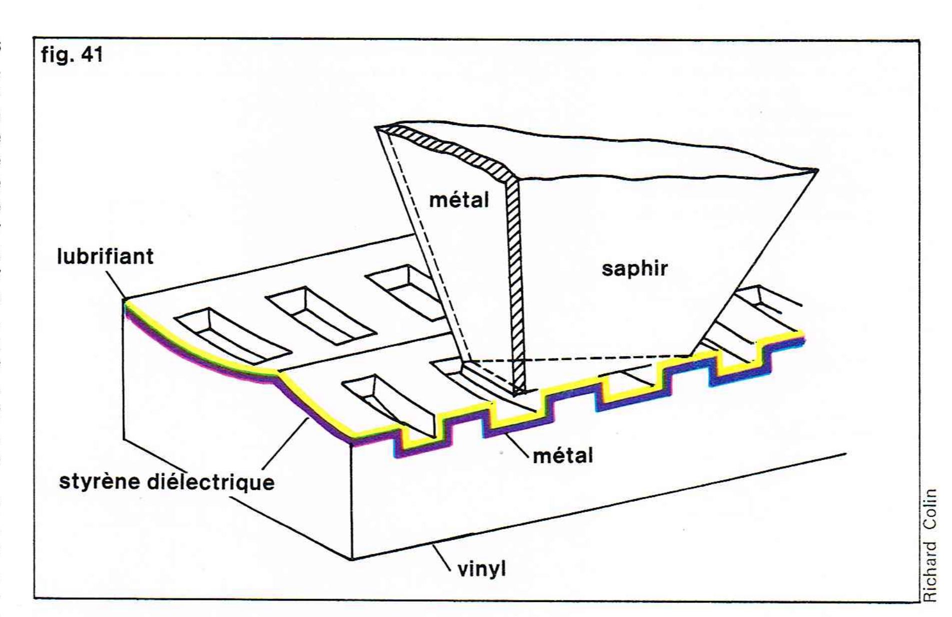
A ces procédés de lecture avec frottement du capteur sur le disque, on oppose des disques à lecture optique. Cela résout radicalement les problèmes d'usure mais conduit à des réalisations plus compliquées et plus chères. Se posant en concurrent du procédé RCA aux États-Unis, le procédé Philips utilise pour lire le vidéodisque un fin pinceau lumineux issu d'un laser à hélium-néon. L'information est enregistrée sur le disque sous la forme de très fines fentes ovales larges de 0,5 μm et profondes de 0,1 μm, dont la longueur et l'espacement représentent le signal vidéo. On détecte les variations de la lumière réfléchie pour le retrouver. Comme aucune action mécanique ne force la tête de lecture à suivre le sillon du disque, au contraire des systèmes précédents, il faut adjoindre un asservissement de guidage qui est, lui aussi, optique.

Thomson fabrique également un vidéodisque à lecture optique qui semble moins compliqué que le précédent. L'information y est enregistrée sous une forme à peu près identique, mais la lecture se fait, cette fois, par transparence, ce qui simplifie la tête de lecture. Mais, surtout, le positionnement du disque par rapport à la tête de lecture est assuré avec une très grande précision (moins de 2 μm) par un système de stabilisation aérodynamique.

Aucun des différents dispositifs décrits ci-dessus ne permet d'enregistrer directement les images de télévision. Seuls des procédés industriels spéciaux permettent de reporter l'information sur ces disques. Leur seule utilisation possible est donc la diffusion en un grand nombre d'exemplaires (pour abaisser le coût de la fabrication) de programmes susceptibles d'être observés plusieurs fois avec intérêt par le même public, pour la formation ou l'enseignement par exemple, ou par des publics différents.

Un autre système de disque sur lequel l'enregistrement est magnétique a vu le jour en Allemagne dernièrement. Le « Magnetic Disk Recorder » (MDR) a une durée de 45 minutes environ pour ses deux faces. En allant de la périphérie au centre de ce disque, on trouve un film magnétique de 8 μm jusqu'au tiers du rayon, puis une plage qui constitue un sillon de guidage de la tête magnétique de lecture ou d'écriture. En effet, un avantage de ce système par rapport aux précédents consiste dans le fait qu'il est possible à l'utilisateur d'enregistrer lui-même le signal vidéo comme sur une bande. La tête magnétique est une ferrite avec un entrefer extrêmement faible de 0,3 μm, ce qui demande une réalisation particulièrement soignée. Le disque tourne à 150 tours par minute. Son usure est uniquement due au sillon de guidage qui n'autorise guère plus de 300 passages. Ce procédé permet d'enregistrer une image en couleurs avec une définition un peu inférieure à 400 points.

La plupart de ces dispositifs à disque sont encore en gestation. Certains d'entre eux sont montrés régulièrement depuis quelques années dans les manifestations et expositions où se rencontrent les professionnels de la communication, de l'information et du spectacle, sans apparaître pour autant sur le marché ni professionnel ni grand public. Les avis sont d'ailleurs partagés sur l'utilité ou l'intérêt de telles formes de diffusion de programmes éducatifs ou récréatifs. Tout se passe comme si les grands fabricants de matériel vidéo se tenaient prêts à « sortir » rapidement un système de diffusion de programmes enregistrés sur disques le jour où une étude de marché leur aura montré que le moment est venu.



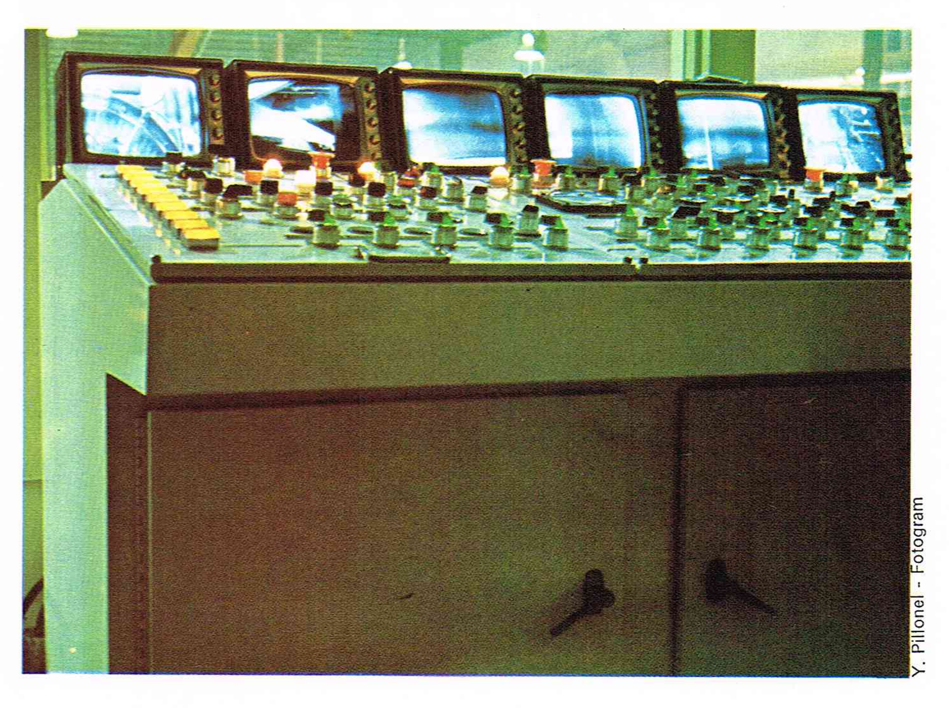

▲ *Figure 41 : aspect et constitution des sillons d'un vidéodisque RCA et de son capteur.*

## La télévision industrielle - Autres emplois de la télévision

La télévision dont on parle le plus communément à l'heure actuelle est celle qui est radiodiffusée et que tout un chacun peut regarder chez lui, pourvu, bien sûr, qu'il ait un poste de réception. Il existe cependant d'autres applications de la télévision qui n'utilisent pas la transmission par ondes radio-électriques, soit parce que l'image de la scène observée doit être faite dans un lieu qui n'est pas très éloigné, et alors on utilise une transmission par câble, soit parce que le public auquel l'image est destinée est en nombre suffisamment petit et peu dispersé pour que l'on puisse utiliser une distribution en circuit fermé. Il y a aussi — cela se développe de plus en plus — l'utilisation des amateurs pour la conservation d'images-souvenirs, d'équipements portatifs de prix relativement faible devant le prix des équipements professionnels qui se placent en concurrents du cinéma amateur traditionnel.

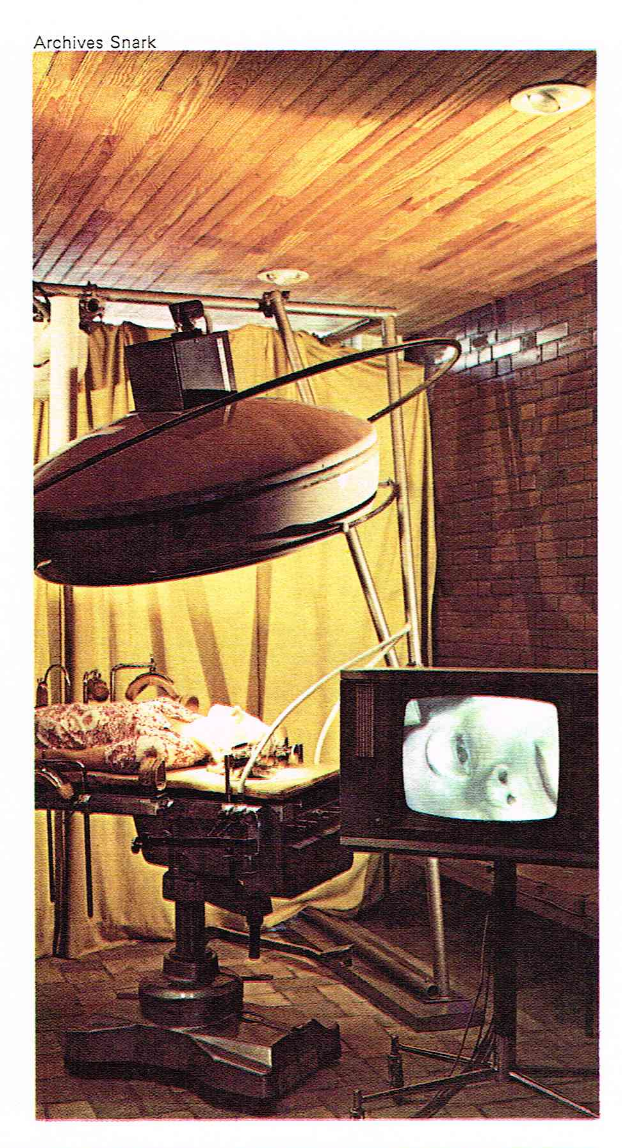
L'industrie fait maintenant un usage abondant de la télévision pour de nombreuses applications, de surveillance en particulier. Elle permet, en effet, de regrouper en un seul endroit plusieurs images de ce qui se passe en des endroits parfois très éloignés les uns des autres et autorise ainsi la surveillance d'installations très étendues par une seule personne. Il devient possible aussi de suivre de

▼ *La salle de contrôle d'une usine munie d'écrans de télévision ; ce système regroupe en un seul endroit plusieurs images de ce qui se passe dans des lieux différents et permet la surveillance d'installations très étendues par une seule personne.*



▶ *Une application de la télévision en circuit fermé au domaine médical : une caméra de télévision en couleurs est installée dans un scialitique afin de mieux surveiller une patiente.*

Archives Snark



▼ *Un autre exemple de la télévision en circuit fermé : la régie et le studio de télévision du lycée de Marly-le-Roi.*



Archives Snark - Thumson - CSF

manière continue ce qui se passe dans des endroits inaccessibles à un observateur, soit parce que l'espace y est trop exigu, soit parce que les conditions de séjour y sont rédhibitoires. Il faut alors, bien sûr, que la caméra de prise de vues soit convenablement protégée des agressions extérieures par un capotage bien étudié. Ce type de caméra de surveillance est installé à poste fixe et vise de manière fixe un champ déterminé, ou bien elle est placée sur une plate-forme télécommandée dont les mouvements peuvent se faire suivant plusieurs axes ; on peut même l'équiper d'un objectif zoom pour ajuster le champ observé au mieux de ce que l'on veut suivre.

On peut souligner ici que l'utilisation de la télévision a non seulement permis de faire des économies de main-d'œuvre en autorisant une automatisation poussée, mais qu'elle a aussi ouvert la voie à l'application de procédés nouveaux en permettant de suivre leur déroulement et ainsi de les contrôler. Par exemple, on dispose maintenant de tubes de prise de vues tellement sensibles (sans parler des amplificateurs de brillance) que l'on peut voir sur l'écran d'un récepteur de télévision ce qui se passe dans une pièce obscure. C'est le cas du tube Tivicon de Philips, pour des éclairements allant de 0,2 à 100 000 lux.

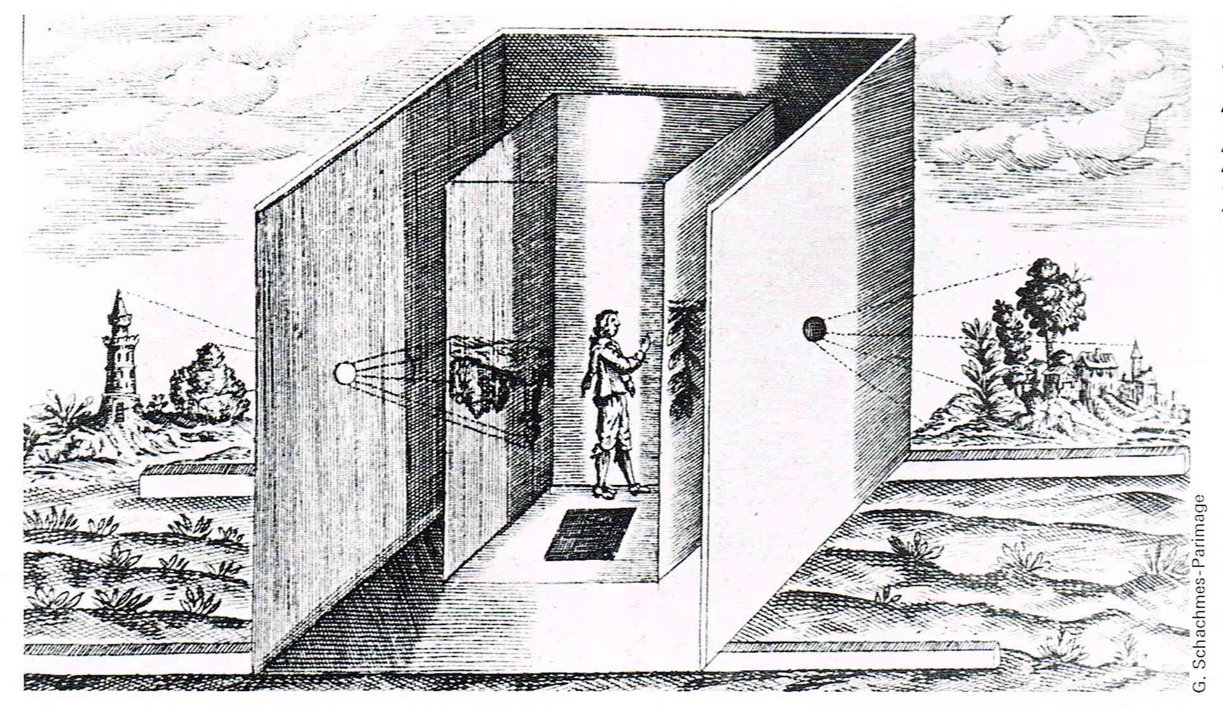
Beaucoup d'autres applications existent pour la télévision en circuit fermé, qu'elle soit en noir et blanc ou en couleurs : dans le domaine médical ou dans l'enseignement, dans la recherche scientifique...

La télévision étend constamment son domaine d'application en diversifiant aussi bien les images qu'elle reproduit que les moyens de leur transmission. Il se développe même actuellement des jeux qui utilisent le récepteur de télévision comme écran pour suivre les évolutions d'une balle de tennis, par exemple, que se renvoient deux joueurs disposant d'une petite boîte avec un bouton leur permettant de déplacer leur raquette sur l'écran. Le score apparaît en chiffres également sur l'écran entre le moment où un point vient d'être marqué et celui où une nouvelle balle est remise en jeu. Plusieurs de ces types de jeux sont proposés à un ou deux joueurs aussi bien pour les téléviseurs en noir et blanc que pour les récepteurs en couleurs.

La téléinformatique emprunte de plus en plus l'écran des téléviseurs pour faire apparaître les textes de ses messages. Une forme spécialisée d'information naît de cette utilisation. On songe à proposer aux possesseurs de récepteurs de télévision des possibilités d'accès à des « banques de données » de toutes natures : horaires de trains, programmes de manifestations culturelles, nouvelles de l'Agence France-Presse... Sur l'écran du téléviseur apparaît alors un texte formé de caractères recomposés sur place par un boîtier contenant l'électronique nécessaire. La transmission des informations se fait de deux manières principalement : par voie hertzienne (elle arrive en même temps que le signal vidéo habituel, superposée à lui ou sur un canal séparé), ou bien par voie téléphonique. Dans ce dernier cas, on appelle par le téléphone un numéro particulier qui est celui d'un ordinateur, qui envoie en retour sur la ligne un message décodé sur place et qui apparaît sur l'écran en quelques lignes d'une page d'écriture. Le premier procédé fait référence au système ANTIOPE (« Acquisition numérique et télévisualisation d'images organisées en pages d'écritures ») ; le second est le système TIC-TAC mis au point par le CNET (voir le chapitre *Techniques de presse*).

## BIBLIOGRAPHIE

AISBERG E., DOURY J.-P., *La télévision en couleurs ?... c'est presque simple !* Société des Éditions Radio. - BESSON R., *Cours élémentaire de télévision moderne*, Éditions Radio. - *Téléviseurs à transistors. Théorie. Pratique*, Éditions Radio. - DARTEVELLE Ch., *les Magnétoscopes. Théorie et Pratique*, Éditions Radio. - *Réglage et Dépannage des téléviseurs couleurs*, Éditions Radio. - GUILLIEN R., *la Télévision en couleurs*, Que sais-je ?, Paris, Presses universitaires de France. - HOLM W. A., *la Télévision en couleurs*, Bibliothèque technique Philips, Paris, Dunod. - PLOTTIN G., FAGOT J., *les Émetteurs de télévision*, collection « Techniques électroniques », Masson. - ENCYCLOPÆDIA UNIVERSALIS, article sur *la Couleur*, P. Fleury, Institut d'optique théorique.



◀ *Une chambre obscure du milieu du XVII^e siècle, système précurseur de l'appareil photographique ; cette chambre mobile pouvait être transportée par deux hommes ; l'observateur qui y entrait par une trappe aménagée dans le plancher pouvait dessiner sur la paroi de papier le contour de l'image formée.*

G. Schachmes-Parimage

# LA PHOTOGRAPHIE

## *Création et évolution de la photographie*

Le désir de fixer les images du monde extérieur telles que les reçoit notre vue est aussi vieux que l'humanité elle-même. Ces images, réalisées depuis des temps immémoriaux par des procédés manuels, ont évolué avec les progrès des civilisations, depuis les peintures préhistoriques primitives découvertes dans les cavernes, jusqu'aux dessins précis et fidèles d'un Ingres ou aux portraits et paysages naturalistes parfaits des siècles récents. Ce développement, accompagné de la création constante de nouvelles méthodes et de nouveaux outils, s'est aussi inspiré nécessairement de l'évolution des sciences telles que l'optique et la chimie. Rien d'étonnant de voir ainsi, au cours des XVII^e et XIX^e siècles, de plus en plus de peintres et dessinateurs se servir de chambres obscures, précurseurs des appareils photographiques, pour retenir avec précision les contours des modèles de leurs tableaux, ou de multiplier, au XVIII^e siècle, les tentatives pour fixer plus ou moins automatiquement les images. A cette évolution des moyens techniques s'ajoutent évidemment les besoins créés par les modifications des structures sociales. De plus en plus d'images sont nécessaires pour satisfaire la bourgeoisie, qui demande des portraits et des reproductions moins chers que les portraits peints, réservés jusque-là à l'aristocratie. On voit ainsi se répandre la technique des silhouettes, et on assiste en 1786 à l'invention, par *Gilles-Louis Chrétien*, du physionotrace, dispositif destiné à graver à l'aide d'un pantographe une plaque de cuivre d'après l'image du sujet projetée sur l'écran de la chambre noire.

*Wedgwood* et *Davy* avaient obtenu des images par des procédés photochimiques fondés sur l'action de la lumière sur le nitrate d'argent ; cette première réussite, présentée en 1802 à l'Institution royale de Grande-Bretagne, resta sans conséquence, puisqu'il n'y avait encore aucun moyen pour enlever aux images, après leur formation, leur sensibilité à la lumière, dont la persistance empêchait la conservation. C'est à *Joseph-Nicéphore Niepce*, de Chalon-sur-Saône, que revient le mérite d'avoir réalisé les premières photographies durables, bien que celles-ci ne nous soient pas parvenues. Très intéressé par la lithographie, autre technique servant à multiplier des images, Niepce trouva en effet, en tentant de fixer de différentes façons l'image de la chambre obscure, un vernis sensible à la lumière, constitué de bitume de Judée dissous dans de l'huile de lavande. Devenant insoluble, par l'exposition à la lumière, dans un solvant d'huiles de pétrole et de lavande, une couche du vernis sensible appliquée sur une plaque d'argent poli donnait directement, après exposition dans la chambre obscure et développement dans le solvant, une image négative.

Toutefois, la réalisation du premier procédé photographique de grande diffusion était réservée à un autre inventeur français, *Louis-Jacques Mandé Daguerre*. Associé d'abord à Niepce dans un effort commun de mise au point d'un procédé photographique, Daguerre ne réussit que plus tard, après le décès de Niepce et plus de deux années d'études de chimie et de recherches personnelles, à créer son procédé, la *daguerréotypie*. Présenté par Arago à l'Académie le 7 janvier 1839, ce



G. Schachmes-Parimage

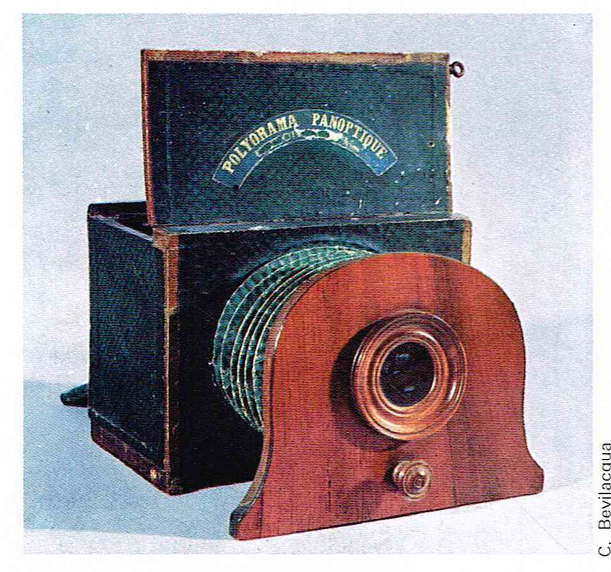
▲ *Nicéphore Niepce (1765-1833) a réalisé les premières photographies durables ; malheureusement, aucune d'entre elles ne nous est parvenue.*



Archives photographiques, Paris

◀ *Louis Daguerre (1787-1851) fut d'abord l'associé de Niepce ; quelques années après la mort de celui-ci, il réussit à créer la daguerréotypie, procédé fondé sur la grande sensibilité des halogénures d'argent à la lumière.*

▶ *L'appareil photographique de Daguerre (Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris).*




C. Bevilacqua

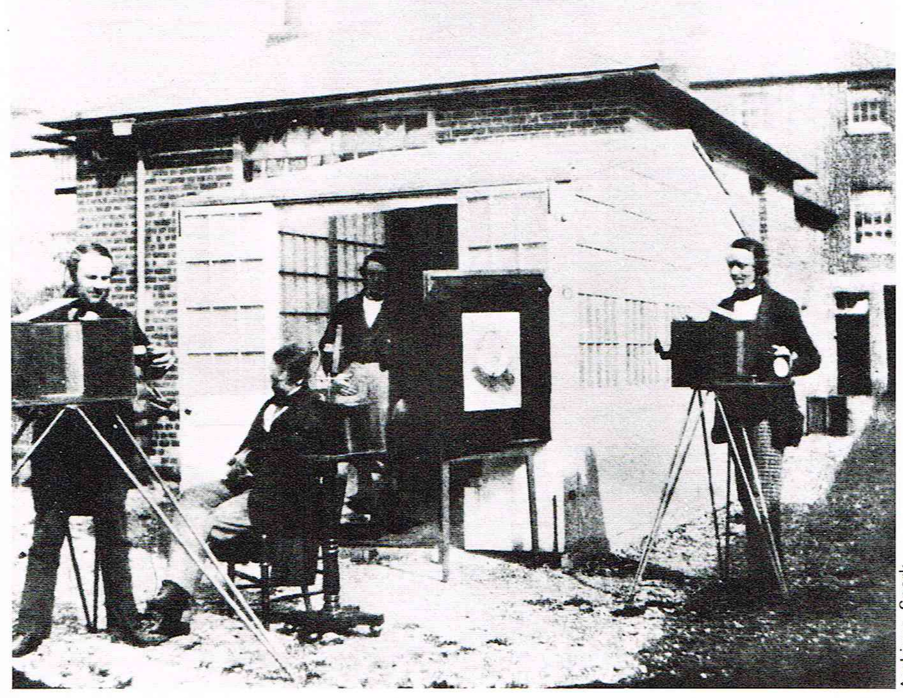
procédé reste toujours remarquable dans ses principes, pour deux raisons. D'abord, il est fondé sur la grande sensibilité à la lumière des halogénures d'argent, qui est encore aujourd'hui la base des principaux procédés photographiques. Par ailleurs, la daguerréotypie est la première méthode faisant appel à une image latente invisible, précédant l'image définitive qui, elle, résulte d'un apport supplémentaire d'énergie par un traitement ultérieur à la prise de vue, le développement. En effet, la matière photosensible de la daguerréotypie est l'iodure d'argent, obtenu en exposant une plaque argentée et polie à des vapeurs d'iode. Après exposition dans une chambre obscure, qui ne fait encore apparaître aucune image visible, l'image est développée par l'action de vapeurs de mercure sur la plaque impressionnée. Le mercure, se déposant sur l'argent de l'image latente dans les parties exposées à la lumière, fait alors apparaître l'image dans tous ses détails. Elle est rendue stable, enfin, par fixage dans une solution chaude de sel marin ou d'hyposulfite de sodium, solvant des halogénures d'argent découvert par sir John Herschel.

Dès sa présentation, la daguerréotypie connaît un succès énorme : cinq éditions françaises de la brochure de Daguerre sont épuisées dès 1839 ; elles sont suivies par dix éditions allemandes, quatre éditions anglaises, et d'autres en Italie, en Espagne, en Suède et en Amérique du Nord. Après plusieurs perfectionnements augmentant la sensibilité du procédé, et aussi après une amélioration de la qualité des images par un virage à l'or, due à Hippolyte-Louis Fizeau, la daguerréotypie devient la méthode la plus généralement employée pour les portraits et les paysages. Rares sont les familles qui n'ont pas conservé jusqu'aux temps actuels une ou plusieurs de ces images de leurs aïeux. Toutefois, la découverte du principe des méthodes modernes de la photographie eut, en outre, une origine différente.

Expérimentant dès 1833 de la même façon que Niepce et Daguerre, un Anglais, *William Henry Fox Talbot*, développa un procédé comportant deux étapes successives, d'abord un négatif, et ensuite l'image définitive sous forme d'un positif sur papier. Breveté en 1841 sous le nom de *calotype*, le procédé de Talbot employait comme matériau sensible du chlorure d'argent, déposé sur les feuilles de papier par immersions successives dans des solutions de sel marin et de nitrate d'argent. L'image originale étant négative, Talbot rendit son support translucide à l'aide de cire et copia l'image par exposition d'une deuxième feuille sensible, identique à la première et appliquée contre elle. Malgré les recommandations de sir John Herschel, Talbot ne se servit pas d'hyposulfite pour fixer ses images ; il les fixa par immersion dans des solutions soit de sel commun, soit d'iodure de potassium, bien moins efficaces. L'implantation de la daguerréotypie était toutefois si forte que les calotypes, malgré les efforts de plusieurs photographes, même en Amérique, ne réussirent pas à supplanter le procédé de Daguerre.

La daguerréotypie n'a été remplacée que par l'invention d'un autre procédé, donnant des images aussi précises et nettes, mais avec des temps d'exposition beaucoup plus courts : le *collodion humide*, inventé en 1851 par l'Anglais *Frederick Scott Archer*. Presque aussi délicat et compliqué que la daguerréotypie, le collodion humide a trouvé une application générale, non seulement par sa sensibilité plus élevée, mais parce qu'il donnait des négatifs sur verre qui ont permis le tirage d'autant de positifs sur papier que l'on désirait. Les plaques de verre, soigneusement nettoyées, recevaient une couche de solution alcoolique de nitrate de cellulose contenant du bromure ou iodure de potassium, d'ammonium ou de cadmium. Sensibilisées ensuite, après l'évaporation partielle de l'alcool, par immersion dans une solution de nitrate d'argent qui formait, dans la couche, de l'iodure ou du bromure d'argent, elles étaient exposées encore humides, pour pouvoir être développées et fixées avant le séchage de la couche de collodion qui les aurait rendues imperméables. L'utilisation du collodion humide

▼ *A gauche, une photo prise en 1845 selon le* procédé Talbot, *ou* calotype, *montrant les établissements d'imprimerie Fox-Talbot (Arch. Science Museum, Londres). A droite, un daguerréotype ; le procédé de Daguerre fournissait directement une image positive, ne permettant d'obtenir qu'un exemplaire unique.*



Archives Snark



I.G.D.A. - C. Bevilacqua

nécessitait donc toujours une chambre noire sur place, pour la préparation des plaques sensibles et leur traitement immédiat. On ne peut qu'admirer les photographes courageux et enthousiastes qui utilisèrent ce moyen encombrant et incommode dans des circonstances extraordinaires et souvent très difficiles, par exemple en haute montagne, en ballon (Nadar), parmi la faune sauvage des steppes africaines, ou pendant la guerre de Crimée et la guerre civile en Amérique du Nord.

C'est pour une autre raison, aussi, que le collodion humide a remplacé la daguerréotypie. Scott Archer avait imaginé, en effet, de l'utiliser pour l'*obtention directe d'images positives*. Lorsqu'on blanchissait l'image argentique immédiatement après sa formation et qu'on l'appliquait contre un fond noir, elle devenait positive sans avoir les reflets métalliques des daguerréotypies. Montées dans les cadres de celles-ci, ces nouvelles images, appelées ambrotypes, les remplacèrent rapidement. Mais l'application générale de la photographie devait attendre un autre perfectionnement, celui des plaques sèches au gélatino-bromure d'argent.

En 1871, un médecin anglais, le docteur *R. L. Maddox*, décrivait, dans une lettre à l'éditeur du *British Journal of Photography*, ses expériences avec de nouveaux liants des halosels d'argent pour les fixer sur les plaques de verre. Un de ces liants, la *gélatine*, se révélait particulièrement avantageux sur le plan pratique, parce qu'il augmentait considérablement, de façon d'abord inexplicable, la sensibilité. Le remplacement du collodion par la gélatine, repris par de nombreux photographes, a créé une véritable révolution de la photographie. Il libérait non seulement les photographes de la préparation de leurs matériaux sensibles, mais il leur permettait de conserver les plaques, avant et après l'exposition, pendant des durées illimitées, et, ce qui était encore plus important, il demandait des temps d'exposition suffisamment courts pour rendre possibles des prises de vue instantanées, souvent même sans trépied.

Cette évolution du procédé photographique a eu de grandes conséquences : d'abord la création d'un nouveau métier, celui du photographe-portraitiste, dont les studios se multiplient à vue d'œil. Employant de façon judicieuse la lumière du jour, savamment tamisée et dirigée par des jeux de rideaux et de voiles, ces portraitistes créent le style classique des images douces se perdant dans un fond blanc. D'autre part, l'emploi de la photographie pour des buts documentaires ne se limite plus aux explorateurs, aux scientifiques, aux historiens de l'art, mais il se répand pour des usages très divers, appelés du terme générique de « photographies d'amateurs ». Exécutée surtout avec des « chambres touristes », appareils photographiques en bois sur trépied, à plaques de verre de 13 × 18 cm, la photographie primitive d'amateurs se développe rapidement en s'orientant aussi vers les prises de vue de scènes de la vie familiale, baptêmes, fiançailles et mariages, et des images d'enfants. En même temps, les premiers reportages photographiques débutent avec l'illustre série d'instantanés de *Nadar*, pris lors du centième anniversaire du célèbre chimiste Eugène Chevreul.

Les possibilités immenses de la photographie d'amateurs ont été reconnues et développées par *George Eastman*, qui, déjà du temps du collodion humide, était un amateur enthousiaste de la photographie. Ayant débuté par la fabrication de plaques photographiques au gélatino-bromure d'argent sur verre, Eastman s'est bientôt intéressé à la possibilité de remplacer le support lourd et fragile de ses plaques par un matériau léger et flexible. Après de nombreux essais avec des supports pelliculables de papier et de gélatine, il réussit enfin à fabriquer un support convenable de nitrocellulose et invente ainsi le *film photographique*. Or, contrairement à ses espoirs, les photographes de l'époque se montrèrent plus conservateurs qu'il ne l'avait prévu, et le remplacement des plaques par le film ne se fit que très lentement. Pour y remédier, Eastman décida d'atteindre le grand public avec son nouveau produit. Il avait déjà lancé en 1888 son premier appareil pour la photographie d'amateurs : une boîte du type « box-caméra » contenant un rouleau de papier sensible pour la prise de cent négatifs développés et tirés à l'usine; en 1891, il met sur le marché le film d'amateurs en petits rouleaux, protégés par une bande de papier noir, étanches à la lumière pour pouvoir être chargés dans les appareils en plein jour. Suivi du lancement des premiers « petits » appareils pliants, ce nouveau développement suscite un type entièrement nouveau d'amateurs. Obligés jusque-là de développer eux-mêmes leurs négatifs et de tirer leurs épreuves, et, par conséquent, plutôt intéressés par le fonctionnement de la photographie, les amateurs avaient été détournés du véritable objet de leurs efforts, qui aurait dû être l'obtention d'une image. Libérés des manipulations, ils peuvent alors se concentrer sur le choix de leurs sujets et sur leur présentation, leur cadrage, leur éclairage, en un mot se consacrer entièrement à leur but essentiel. Ce changement a révolutionné la photographie d'amateurs et contribué à lui donner une dimension insoupçonnée jusqu'alors.

En Europe, la photographie d'amateurs subit une évolution du même ordre, mais différente sur le plan technique, qui contribue dans une large mesure à la généralisation de ce moyen commode de création d'images. L'importance de la photographie grandit, par ailleurs, grâce à une succession d'améliorations des objectifs et des appareils, et à l'introduction, vers la fin du siècle dernier, du papier « gaslight », portant des couches sensibles semblables à celles des plaques et films, beaucoup plus sensibles et d'une utilisation plus facile que les papiers à noircissement direct au soleil précédemment employés. Le résultat le plus important de cette évolution générale est la création et la croissance rapide de nombreuses industries optiques et chimiques, et d'usines fabriquant des appareils photographiques pour les utilisations les plus diverses. Le gain de netteté dû à l'invention d'ob-


Collection Viollet

▲ ***La daguerréotypie a été remplacée par le procédé au collodion humide, qui donnait des négatifs sur plaques de verre ; ceux-ci permettaient le tirage d'un nombre illimité de positifs sur papier. Munis de ce matériel encombrant, des photographes tels que Nadar n'hésitaient pas à aller en montagne ou à monter en ballon.***



Archives Snark

▲ *Le remplacement des plaques photographiques par des films en petits rouleaux et les premiers appareils pliants ont suscité l'apparition d'un type nouveau de photographes amateurs ; ici, des femmes prenant une photo au début du XX^e^ siècle.*

▼ *Figure 1 : schéma de principe du procédé* Autochrome Lumière *(premier procédé de photo en couleurs accessible au public) ; a, coupe du film* Autochrome *après l'exposition et le premier développement ; b, coupe après l'inversion restituant les couleurs de l'original par synthèse additive.*

jectifs optiquement parfaitement corrigés, d'ouvertures relativement grandes et à faible nombre de lentilles, tels que les « Cookes » et « Tessars », contribue à une première diminution des formats, qui, au début du siècle et avant la Première Guerre mondiale, se généralise, en Europe avec le format de 9 × 12 cm, et aux États-Unis avec le format équivalent de 4 × 5 pouces, mais ne libère pas encore entièrement les photographes de l'emploi des trépieds.

Cette évolution vers la diminution des formats s'est évidemment accentuée pendant la Première Guerre mondiale et s'est accélérée après celle-ci, avec la généralisation des appareils pliants pour films en rouleaux, d'abord de 6 × 9 cm et ensuite de la moitié de ce format, le 4 1/2 × 6 cm. Suivie par l'introduction du film de cinéma perforé de 35 mm dans le domaine de la photographie, par l'invention du Leica par un fabricant de microscopes spécialisé dans la fabrication d'optiques et d'appareils de haute précision, la diminution des formats a obligé les fabricants des surfaces sensibles à faire les efforts nécessaires pour diminuer le grain des négatifs et pour augmenter leur netteté et leur pouvoir de résolution. Avec la Seconde Guerre mondiale s'établit alors l'emploi général du *« petit format »* de 24 × 36 mm ; la voie est ainsi ouverte, d'une part, à l'introduction des appareils de haute précision, surtout de fabrication japonaise, et, d'autre part, à l'utilisation générale de la couleur en photographie. A cette évolution s'ajoute enfin la simplification d'emploi, qui a débuté en 1963 par l'apparition des appareils Instamatic-Kodak à chargement instantané, et s'est dirigée ensuite vers une nouvelle diminution du format, celui des appareils de poche employant un film perforé d'une largeur de 16 mm seulement.

Ces derniers développements n'auraient pas été possibles sans l'avènement de la reproduction photographique du monde tel que nous l'apercevons réellement, c'est-à-dire en **couleurs.** Pendant le premier siècle de son existence, la photographie était en effet entièrement caractérisée par l'absence de ce paramètre essentiel de la perception visuelle, lacune déjà sévèrement éprouvée par les premiers inventeurs. Leur déception de ne pas pouvoir fixer dans toutes leurs caractéristiques les vues apparaissant sur les écrans de leurs chambres obscures ne peut pas être mieux exprimée que par deux phrases d'une lettre adressée en 1816 par Nicéphore Niepce à son frère Claude :

« Les expériences que j'ai faites jusqu'ici me portent à croire que mon procédé réussira bien quant à l'effet principal ; mais il faut parvenir à fixer la couleur : c'est là ce qui m'occupe en ce moment et c'est ce qu'il y a de plus difficile. Sans cela la chose n'aurait aucun mérite et il faudrait m'y prendre d'une autre manière. »

L'absence de la couleur en photographie avait eu pour principal effet la naissance d'une expression artistique nouvelle, ne restituant les formes que par le jeu des valeurs monochromes de l'image, comparable en cela à la sculpture. Toutefois, le désir des inventeurs de la reproduction photographique n'en tenait nullement compte : pour eux, la reproduction photographique devait pouvoir saisir tous les aspects physiques des images perçues ; ils ont donc poursuivi leurs efforts pour résoudre ce problème.

Le principe de la trichromie du mécanisme de la vision ayant été établi en 1802 par Thomas Young, il ne restait qu'un pas à franchir pour l'appliquer aussi à la photographie. Voulant démontrer à l'aide de la photographie — qui était alors un moyen scientifique nouveau — la validité de l'hypothèse de trichromie de la vision, *James Clerc Maxwell* inventa en 1860 le principe fondamental de la *photographie additive trichrome,* fondé sur le principe du retour inverse de l'optique et appliqué à présent dans la télévision en couleurs. Indépendamment, une autre solution fut découverte quelques années plus tard, en 1869, par *Louis Ducos du Hauron.* Tandis que la synthèse trichrome de la reproduction photographique de Maxwell est additive, réalisée par la superposition des trois images projetées en lumières fondamentales rouge, verte et bleue, Ducos du Hauron obtient la synthèse par la superposition de trois images en couleurs complémentaires aux fondamentales, donc en cyan (bleu-vert), magenta et jaune. Une proposition très voisine est faite à peu près en même temps par Charles Cros, mais certaines faiblesses de son raisonnement ont laissé à Ducos du Hauron le mérite de l'invention de la *synthèse trichrome soustractive,* qui est encore aujourd'hui le principe fondamental de la photographie et de l'impression en couleurs.

L'industrialisation de la photographie en couleurs n'a eu lieu que bien plus tard. Le premier procédé vraiment accessible au public et régulièrement fabriqué fut l'*Autochrome* des frères *Auguste* et *Louis Lumière,* mis sur le marché en 1903 (*fig.* 1). Cette réalisation, extraordinaire pour l'époque, était fondée sur la synthèse additive, obtenue visuellement par la juxtaposition de minuscules filtres rouges, verts et bleus, couvrant toute l'image, et superposés à un positif obtenu par exposition à travers ces mêmes filtres et développement par inversion. Inventé une dizaine d'années auparavant par l'Irlandais John Joly, ce procédé ne put trouver d'application générale que grâce aux éminents travaux et recherches chimiques des frères Lumière, et les plaques et films Autochromes furent fabriqués par eux en France et, en Allemagne, sous leur licence, par Agfa. Le procédé Autochrome fut largement utilisé, surtout dans les reportages géographiques, mais aussi par un bon nombre d'amateurs qui tiraient parti de la facilité de son emploi. Cependant, l'application générale de la couleur en photographie ne devint possible que dans une autre voie.



Richard Colin

Ducos du Hauron avait proposé, en effet, de réaliser des photographies en couleurs de synthèse soustractive en superposant les trois couches sensibles directement sur un seul support. Il lui manquait toutefois, à cette époque, la plupart des éléments de base nécessaires à la réalisation de cette idée. Elle fut reprise avant la Première Guerre mondiale par des chimistes allemands qui tentèrent d'abord d'utiliser pour la synthèse trichrome les composés chimiques colorés, formés au cours du développement par l'oxydation de certains agents développateurs. Cette solution, expérimentée par B. Homolka et R. Fischer dès 1907, ne permit pas, toutefois, la réalisation de procédés pratiques ; il a fallu, pour cela, que les développateurs autocouplants soient remplacés par des dérivés de la para-phénylène-diamine, capables de réagir au cours du développement avec des coupleurs, composés complémentaires formant les colorants requis. (Le lecteur trouvera dans les chapitres suivants l'explication plus détaillée de certaines notions et de termes techniques, mentionnés seulement très succinctement dans ce résumé historique.)

Un deuxième problème restait à résoudre : empêcher la diffusion des colorants ainsi formés d'une couche dans l'autre. Les deux mécanismes nécessaires pour donner ces résultats ont été inventés en Allemagne par *Rudolph Fischer*, le premier concernant la synthèse des colorants appropriés, juste avant le début des hostilités de 1914, et le deuxième concernant l'absence de la diffusion des colorants vers 1930 seulement. Aux États-Unis, Léo Godowsky et Léopold Mannes ont imaginé une tout autre solution pour empêcher cette diffusion : former les trois colorants de la synthèse par le même mécanisme de copulation, mais séparément, l'un après l'autre dans sa couche respective, dans trois bains distincts de révélateurs. On voit ainsi paraître en 1935 sur le marché, simultanément, le procédé allemand *Agfacolor Nouveau* à coupleurs incorporés suivant les brevets de Fischer, et le procédé américain *Kodachrome* aux coupleurs introduits dans les bains de révélateurs, donnant tous deux directement des diapositifs en couleurs, d'une qualité jusqu'alors jamais atteinte. Cela ouvre la voie à une série de développements et d'inventions ultérieurs qui ont conduit à la généralisation de la couleur en photographie.

Une brillante idée de deux autres inventeurs américains, Wesley Turnell Hanson et Paul Vittum, a donné la possibilité d'incorporer directement les procédés de correction « par masques » des couleurs reproduites dans les couches superposées des films négatifs de prise de vue. Ces corrections, indispensables pour la reproduction satisfaisante des couleurs naturelles, malgré certaines lacunes inévitables des colorants de la synthèse et l'impossibilité pratique d'appliquer rigoureusement le principe de Maxwell, avaient jusque-là été appliquées dans les procédés d'imprimerie au prix de manipulations délicates et complexes. Leur incorporation directe dans les films par l'emploi de composés chimiques nouveaux, les coupleurs colorés de Hanson et Vittum, permet l'emploi courant de systèmes négatifs-positifs en couleurs, conformes au principe fondamental découvert par Fox Talbot. D'autres méthodes de correction, fondées sur des principes du même ordre découverts par la suite, ont permis d'améliorer encore la fidélité de la reproduction ainsi que la netteté des images et la qualité du grain, et ont contribué, elles aussi, à la généralisation de la photographie en couleurs pour les amateurs et les photographes professionnels, dans la reproduction imprimée et dans le cinéma.

L'excellente reproduction des couleurs, la diminution des formats et la facilité du chargement des appareils n'auraient pas suffi, toutefois, à donner à la photographie le rôle énorme qu'elle a dans la vie moderne. Il fallait encore la libérer de la servitude qu'a constituée pendant plus d'un siècle le choix de la pose correcte : combien de vues, en effet, n'avaient-elles pas été ratées par une sur- ou une sous-exposition ! Pour que la photographie atteignît son plein développement, il était capital de simplifier l'obtention d'épreuves toujours satisfaisantes, quelles que soient les conditions de prise de vue ou d'éclairement du sujet.

Ce problème a été entièrement résolu, de deux manières. Tout d'abord, dans les appareils non automatiques, comme les films négatifs présentent une très grande latitude de pose toutes les vues sont tirables ; au cours du tirage industriel, des tireuses très perfectionnées règlent automatiquement la bonne exposition dans le seul dessein d'obtenir des épreuves satisfaisantes. L'autre solution de ce problème est constituée par la commande automatique, à la prise de vue, des vitesses des obturateurs et des ouvertures des diaphragmes par des photorésistances ultrasensibles au sulfure de cadmium, qui donnent à chaque vue, dès le départ, la pose correcte. Cette deuxième solution est importante surtout pour les appareils à vues instantanées du type *Polaroïd*, où le tirage s'effectue automatiquement par un transfert de composés chimiques entre les couches du négatif et celles du positif, sans possibilité de correction. Il est évident, d'autre part, que les appareils à pose automatique présentent aussi des avantages pour tous les autres types de films, ceux qui donnent des négatifs ou des diapositifs classiques. Le photographe — qu'il soit professionnel ou amateur — est ainsi entièrement dégagé du souci de l'exposition correcte, et il peut se concentrer entièrement sur le caractère intrinsèque de la vue qu'il compte obtenir, c'est-à-dire se consacrer au vrai but de la photographie sans aucune arrière-pensée quant à l'exécution de son action.

En conclusion de ce court résumé historique, nous voyons que la photographie a atteint à présent un niveau de simplicité et d'automatisme lié à un tel perfectionnement des résultats qu'elle constitue un des éléments de la vie quotidienne de l'humanité tout entière.

***▼ A gauche, les frères Louis et Auguste Lumière qui mirent au point le procédé Autochrome permettant la restitution de la couleur en photographie ; leur technique fut commercialisée dès 1903. A droite, une photographie en couleurs réalisée par les frères Lumière en 1910.***



Archivio Turconi



F.S.N.

▶ *L'appareil photographique se présente sous des formes bien différentes, depuis les premières chambres obscures en bois, encore utilisées actuellement (à droite, avec les photographes de rue à Chypre) aux petits chefs-d'œuvre de miniaturisation, de précision et d'automatisme (à gauche).*



S. Prato



G. Peress - Magnum

## Techniques de la photographie

De par son principe, la photographie est fondée sur la combinaison d'éléments optiques, mécaniques et chimiques. D'une part, l'image est créée à l'aide d'objectifs dans des appareils qui ont évolué depuis les premières chambres obscures en bois, en prenant les formes les plus diverses, jusqu'aux chefs-d'œuvre de précision et d'automatisme actuels. D'autre part, l'image formée dans les appareils est enregistrée par une succession de réactions photochimiques et chimiques, partant de la formation de l'image latente et comprenant le développement ainsi que la fixation définitive. L'obtention d'épreuves fait ensuite intervenir des mécanismes du même ordre, sous d'autres formes : lors de l'exposition du papier d'après les négatifs ou les diapositifs classiques, dans des tireuses au moins aussi complexes que les appareils, et lors du traitement continu sur des machines à développer ou pour les vues instantanées du type *Polaroïd* à l'intérieur même des appareils.

### Appareillages et équipements

#### Appareils de prise de vue

Les éléments de base de tous les appareils photographiques sont la chambre obscure, l'objectif avec son diaphragme, l'obturateur et le logement du film photosensible. Il existe de si nombreux modèles qu'il n'est pas possible de les ranger dans une classification exacte, d'autant plus que tous les appareils, même les plus simples, donnent à présent d'excellentes images. On peut néanmoins différencier les appareils suivant leurs buts et le degré de leurs perfectionnements et de leur complexité, d'une part, et, d'autre part, suivant leurs formats.

Les appareils les plus simples, destinés aux enfants et aux amateurs les moins exigeants, ne comportent que les éléments de base, mais ils sont en général solides et précis, puisque leurs corps et objectifs sont en matière plastique moulée, à mise au point fixe ; ils ont, dans le cas le plus simple, une seule vitesse d'obturation. A l'autre extrémité de l'échelle, on trouve les appareils complexes et de haute précision, de construction métallique évoluée. Ils sont équipés, en général, de viseurs à prismes et à miroir escamotable, permettant la mise au point et le cadrage exacts par la surveillance du champ de vision jusqu'à l'instant même de la pose. Ils contiennent, en même temps que les micromécanismes classiques, des microcircuits électroniques et des mémoires agissant sur l'exposition automatique ou semi-automatique. Pour l'emploi de lampes éclair, les diaphragmes s'ajustent souvent automatiquement en fonction de la distance ; ainsi, on a toujours l'assurance d'une exposition suffisante et correcte, en particulier pour les sujets rapprochés qui constituent la plupart des vues. Dans les appareils non automatiques, la pose correcte est obtenue grâce à des indicateurs électroniques, commandés par des photorésistances comme les régulateurs de pose automatique ; ils montrent quel est le réglage approprié de l'exposition par une aiguille logée dans le viseur, au bord du champ photographié.

En ce qui concerne les *formats*, les appareils sont répartis suivant le mode de chargement du film. Pour les films en cartouches, utilisés dans les appareils évolués et complexes, le format 24 × 36 mm constitue la norme, tandis que les formats des appareils à chargement instantané sont le 26 × 26 mm, désigné par le code 126, et le format 110 des appareils de poche, de 13 × 17 mm. On peut ainsi distinguer les appareils relativement lourds et volumineux de la première de ces catégories des appareils 24 × 36 « compacts », sans viseur à prisme et, par conséquent, à mise au point au télémètre ou au jugé, mais ayant l'avantage du poids réduit et d'une meilleure maniabilité, par exemple dans les équipements des ascensions en montagne. La même distinction existe dans les deux formats des grandes séries de vues d'amateurs : les appareils pour cartouches 126 ont des dimensions se situant dans la moyenne des caméras 24 × 36 mm, et les appareils dits « de poche » pour les cartouches 110, de taille et de poids réduits, s'accommodent d'une place minime pour accompagner partout leur propriétaire. A l'autre bout de l'échelle des formats, on trouve enfin les appareils des photographes professionnels, qui ont des formats supérieurs au 24 × 36 mm.

Pour donner à ces professionnels les mêmes facilités que celles que trouvent les bons amateurs dans les appareils 24 × 36 mm, les perfectionnements de toutes sortes incorporés dans ceux-ci sont à présent appliqués aux grandes chambres professionnelles de reportage et de studio, aux formats 9 × 12 cm, 10,2 × 12,7 cm (4 × 5 pouces) et 13 × 18 cm. Il n'y a donc pas de limite exacte entre les appareils professionnels et ceux des amateurs évolués, un très grand nombre de ceux-ci se servant d'ailleurs des mêmes appareils que les professionnels.

Les objectifs interchangeables constituent un autre élément important. En effet, la distance focale normale des objectifs des appareils photographiques est de l'ordre de la diagonale du rectangle ou carré formant l'image. Or, pour éviter des déformations gênantes, surtout dans les portraits, et pour faciliter des prises de vue de sujets distants, on est obligé d'employer des objectifs de distances focales beaucoup plus grandes. D'autre part, il faut, pour la réalisation de vues de paysages et d'architecture, tant extérieures qu'intérieures, des objectifs dits de grand angle, de distances focales bien plus courtes que la normale. Les appareils perfectionnés sont donc équipés de manière à permettre le changement facile de ces divers objectifs, et certains — en particulier ceux de quelques marques japonaises — en comportent



S. Prato



S. Prato



S. Prato

◀ ***Trois photos d'un même sujet réalisées avec des objectifs de différentes distances focales : en haut, objectif de 80 mm, au milieu, objectif de 120 mm et, en bas, objectif de 250 mm.***

une gamme impressionnante. D'autres appareils, surtout dans les séries moyennes, n'ont qu'un objectif de distance focale normale. Il y a enfin des appareils d'amateurs, très simples, du format de poche, équipés de deux optiques de distances focales différentes, incorporées dans le boîtier et interchangeables par simple déplacement d'un levier : ils permettent ainsi la prise de vue soit de groupes ou de paysages, soit de gros plans et de sujets éloignés. D'autres appareils de poche sont équipés d'objectifs zoom, de distance focale variable.

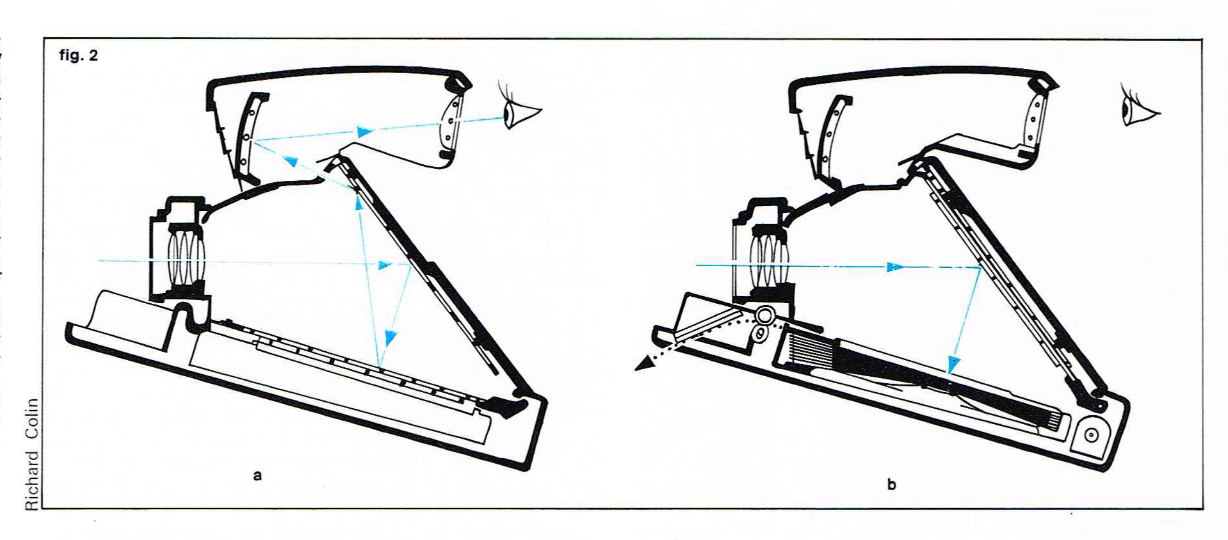
### Appareils à vues instantanées

Les appareils photographiques peuvent être classés d'une autre manière encore, suivant le procédé d'obtention de l'image. Dans tous les appareils classiques, qui constituent la majorité largement prédominante, le film — qu'il soit destiné à donner des négatifs ou des diapositifs — est seulement exposé. Son développement et son tirage ont lieu ensuite en dehors de l'appareil, dans des laboratoires industriels ou artisanaux. Dans les appareils à vues instantanées, en revanche, le traitement et le tirage par transfert chimique sont effectués à l'intérieur de l'appareil. Celui-ci contient alors, non seulement la chambre photographique d'exposition, mais aussi le dispositif de traitement et de tirage. Cela implique, aussi bien pour l'appareil que pour les surfaces sensibles, un équipement spécifique. D'abord, il est nécessaire que l'appareil comporte les logements pouvant contenir, à l'abri de la lumière, les matériaux négatifs et ceux donnant les images positives. Ensuite, il faut des paires de rouleaux très bien alignés pour écraser les sachets contenant, pour chaque vue, la quantité juste nécessaire des produits chimiques du traitement joints au film négatif vierge, véritables petits laminoirs destinés aussi à effectuer la mise en contact des négatifs et des feuilles recevant l'image positive. Ces appareils comportent enfin une ouverture pour la sortie séparée de chaque vue pendant son traitement, immédiatement après son exposition, sans que les films vierges contenus dans l'appareil soient voilés.

L'introduction de l'ensemble de ces mécanismes dans les appareils a graduellement conduit, en même temps que l'évolution de micro-éléments électriques et électroniques, au développement de types entièrement nouveaux d'appareils qui ne ressemblent plus du tout aux chambres obscures, dont ils sont pourtant les héritiers. Cette évolution est due également au principe même de l'obtention des épreuves : résultant d'un transfert, au cours du traitement, de produits chimiques entre les couches sensibles négatives et les couches formant l'image positive — en quelque sorte un tirage chimique par contact —, les épreuves ont exactement la même dimension que le film négatif. Pour donner des images d'une dimension suffisante, les appareils ont donc, au moins dans le sens parallèle au plan de l'image, une taille assez respectable. D'autre part, ils sont nécessairement équipés d'une optique de distance focale correspondante. Pour éviter un encombrement excessif, défavorable par rapport aux appareils classiques de plus en plus petits, de nouveaux chemins optiques complexes à miroirs ont donc été créés, à l'origine, dans l'appareil *Polaroïd SX-70*, diminuant au moins une des dimensions des appareils (*fig.* 2 et 3). Ceux-ci comportent par ailleurs des micromoteurs, qui se chargent, après chaque prise de vue, de l'éjection des épreuves, et des dispositifs d'exposition automatique avec et sans lampes éclair. Cette nouvelle génération d'appareils semble être à l'origine d'une nouvelle époque de la photographie, même si, dans l'ensemble, le nombre global des épreuves instantanées reste très inférieur à celui des épreuves classiques.

### *Agrandisseurs et tireuses*

Les négatifs étant en général trop petits pour donner directement des épreuves au tirage par contact, on les expose dans des agrandisseurs. Les agrandisseurs ne sont rien d'autre que des appareils de projection très précis, équipés pour donner des épreuves nettes et uniformément exposées sur toute leur surface. Ils comportent des boîtes à lumière, soit triples pour l'exposition simultanée en couleurs fondamentales rouge, vert et bleu, soit simples pour l'exposition en lumière blanche et le réglage




▶ *Figure 2 : coupe de l'appareil* Polaroïd SX-70 *à développement instantané ; a, position de vision ; b, position de prise de vue ; cet appareil comporte un système optique particulier : le cadrage et la mise au point sont effectués à travers l'objectif de prise de vue* (a), *et après escamotage instantané du miroir recouvrant les couches sensibles, la photo est prise par un chemin optique simple* (b).

fig. 3

Richard Colin

▶ *Figure 3 : coupes des appareils* Kodak EK4 *et* EK6 *à développement instantané. Ces appareils ont un chemin optique à deux miroirs, indépendant de celui du viseur ; ils comportent un dispositif électronique d'exposition automatique.*

▼ *Figure 4 : schéma de principe de la* tireuse automatique Kodak 2610 *pour le tirage d'épreuves d'amateurs ; dans une première position, le négatif est d'abord analysé, et les données recueillies sont traitées en moins d'une seconde dans un ordinateur, déterminant alors automatiquement les conditions optimales de l'exposition effectuée dans la deuxième position.*

du bon équilibre chromatique par des filtres de correction de couleurs, les « filtres CC ». Leurs objectifs, équipés de diaphragmes, sont conçus spécialement pour les rapports relativement faibles entre les distances du négatif à l'objectif, et de l'objectif à l'épreuve. La mise au point est souvent automatique à l'aide d'une came qui maintient la netteté indépendamment du rapport de grossissement.

L'exposition individuelle de chaque épreuve ne peut pas convenir, toutefois, au tirage des nombres astronomiques d'images positives exposées dans les stations de tirage industriel des épreuves d'amateurs. Ce travail est exécuté sur des tireuses semi-automatiques ou automatiques, autre réalisation extraordinaire employant, encore plus que les appareils, tous les moyens ultramodernes de mémoire et de micro-électronique. Les tireuses — sorte d'agrandisseurs automatisés à rapport de grossissement fixe suivant l'objectif choisi — exposent l'une après l'autre, à cadence élevée, les épreuves sur du papier en rouleaux, d'après des négatifs ou des diapositifs.

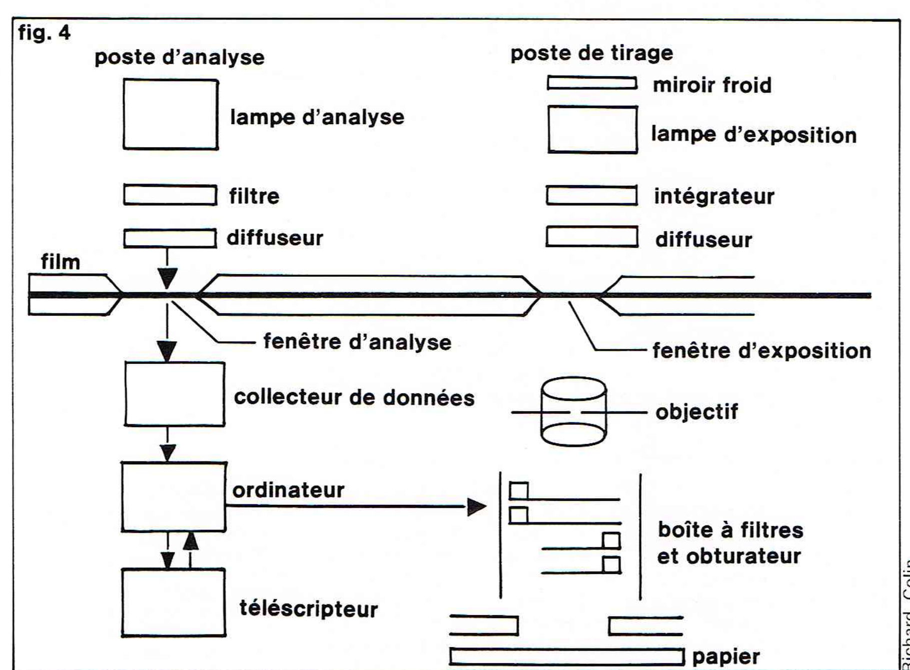
Pour accélérer la production des épreuves, les bandes de douze ou vingt vues négatives de chaque amateur, portant des numéros poinçonnés pour pouvoir être retrouvées après le tirage, sont en général montées en rouleaux continus.

Dans les tireuses semi-automatiques, une opératrice juge dans chaque vue les luminosités relatives des sujets principaux et des fonds, ainsi que le rapport des aires occupées par chacun de ces deux éléments. Dans la majorité des cas, elle ne modifie pas la réaction de la tireuse et déclenche seulement la pose automatique normale. Toutefois, dans les cas où le sujet, très différent du fond, risquerait d'être trop clair ou trop sombre sur l'épreuve à la suite d'une exposition normale, l'opératrice modifie la pose en la rallongeant ou en la raccourcissant de la quantité nécessaire, par un simple déclenchement de touches autres que la touche normale.

Dans les tireuses automatiques, ce jugement est effectué électroniquement par la machine, par exemple, dans les tireuses couleur *Kodak 2610*, par 109 évaluations du négatif, exploré suivant un réseau de lignes horizontales tel que celui d'une image de télévision (*fig.* 4). Chaque négatif est ainsi vérifié en moins d'une seconde pour la valeur du sujet par rapport au fond, pour sa saturation et sa densité de couleur, pour son niveau de voile, et pour 105 autres paramètres, tous importants pour le choix correct de l'exposition optimale. Il est évident que ce tirage automatique présente non seulement l'avantage de l'extrême rapidité inhérente aux réactions électroniques, mais qu'il accroît considérablement la latitude de pose des prises de vues ; il est constant, reproductible, et n'est pas soumis aux facteurs de la fatigue humaine. Les épreuves et les retirages sont alors toujours de la même qualité, ce qui ne peut pas être entièrement assuré lors de l'opération non automatique.

### *Machines à développer*

Le développement des films et papiers photographiques est en général effectué mécaniquement, en continu, sur des machines. Celles-ci sont le plus souvent de deux types : le premier est conçu pour le transport continu soit d'une longue bande de film, obtenue par le collage des courtes bandes des cartouches individuelles l'une après l'autre, soit des bandes de papier exposées dans les tireuses. Les machines à développer de l'autre type transportent chacune de courtes bandes négatives, extraites de chaque cartouche, ou les feuilles séparées de films semi-rigides professionnels, par un système de rouleaux disposés en légers quinconces. Dans ces deux types de machines, les films parcourent un chemin continu à travers une succession de cuves contenant toutes les solutions composant l'ensemble du traitement. On réalise ainsi des productions qui ne seraient



pas aussi importantes par le traitement manuel classique en cuvette, ou même avec les divers dispositifs ou machines à cuves cylindriques, à tambours ou autres mécanismes simples, plutôt destinés au développement de très grandes épreuves.

### *Équipements divers*

La pratique de la photographie fait encore appel à un grand nombre de dispositifs et d'accessoires, tels que des trépieds, des appareils d'éclairage, divers équipements de laboratoire et bien d'autres. Ils sont si nombreux qu'il n'est pas possible d'en donner ici une énumération ou une description.

## *Les matériaux sensibles du procédé classique*

L'enregistrement de l'image à la prise de vue et sa fixation définitive lors de la formation des épreuves sont effectués, nous l'avons vu, par le procédé classique de la photographie, fondé sur la sensibilité à la lumière des halogénures d'argent. Les couches sensibles des films et papiers contiennent donc deux éléments essentiels : le matériau photosensible constitué par les cristaux d'halogénures d'argent maintenus en place par la gélatine, leur liant et les composés chimiques destinés à former pendant le développement les images composées des couleurs élémentaires de la synthèse trichrome. (Voir aussi la description des émulsions sensibles pour la photographie dans le volume *Chimie*, page 269.)

### *Les cristaux photosensibles*

Les **halogénures d'argent** généralement employés sont des bromo-iodures dans les films de prise de vues et les papiers très sensibles, et des chlorobromures dans la plupart des autres papiers et aussi dans des films pour copies positives ou usages particuliers, exigeant un contraste élevé et une netteté exceptionnelle. La sensibilité intrinsèque des cristaux d'halogénures d'argent — de structure cubique à faces centrées — est considérablement accrue par la présence d'impuretés, constituées par l'inclusion dans le réseau cristallin d'atomes de soufre, d'argent ou d'or qui jouent un rôle comparable à celui des impuretés contenues dans les cristaux des semi-conducteurs, employés en micro-électronique. En ce qui concerne leurs tailles, les cristaux des émulsions photographiques sont très petits, de diamètres allant de quelques centièmes à un ou deux dixièmes de micron, contrairement à ceux employés pour certains usages particuliers, par exemple en radiographie, qui sont supérieurs au micron.

Notons qu'en photographie, le terme « émulsion » a une signification qui diffère de l'usage habituel; on appelle ainsi, pour des raisons historiques, la dispersion des microcristaux d'halogénures d'argent dans la gélatine, et on emploie le terme « dispersion » pour les microgouttelettes de solutions de coupleurs, suspendues dans une solution de gélatine, qui devrait en principe être appelée émulsion.

La sensibilité des cristaux d'halogénures d'argent des émulsions photographiques dépend d'abord, suivant la loi de Grotthus-Draper, de leur absorption spectrale. Cette loi précise, en effet, que les réactions photochimiques ne peuvent avoir lieu qu'après absorption des radiations dont elles résultent. Cette absorption d'énergie modifie les équilibres ioniques et électroniques des cristaux et agit ainsi sur leur photosensibilité. Celle-ci dépend donc en deuxième lieu de leur conductivité électrique, fonction, d'une part, des propriétés atomiques et ioniques de leurs constituants et, d'autre part, de leur construction cristalline. La conductivité est, suivant la nature des porteurs de charges déplacés, soit ionique, soit électronique. Dans le premier cas, elle résulte du déplacement d'ions argent interstitiels, dans le deuxième, du seul déplacement des électrons libérés par le rayonnement incident. Ceux-ci, au repos lorsqu'ils se trouvent à l'abri d'une irradiation par un rayonnement bleu ou ultraviolet, acquièrent, lors de l'exposition à ces radiations, l'énergie nécessaire pour quitter la bande de valence et atteindre la bande de conductivité, ce qui leur permet de se déplacer librement et à très grande vitesse dans le cristal, comme s'il était un conducteur métallique. Le mouvement ionique, au contraire, résultant d'un déplacement de proche en proche d'ions argent, beaucoup plus grands que les électrons, est plus lent et dépend dans une large mesure de la température, contrairement au mouvement des électrons qui en est pratiquement indépendant. Ces bases intrinsèques de la photosensibilité des halogénures d'argent déterminent — nous allons le voir — la formation de l'image latente pendant l'exposition.

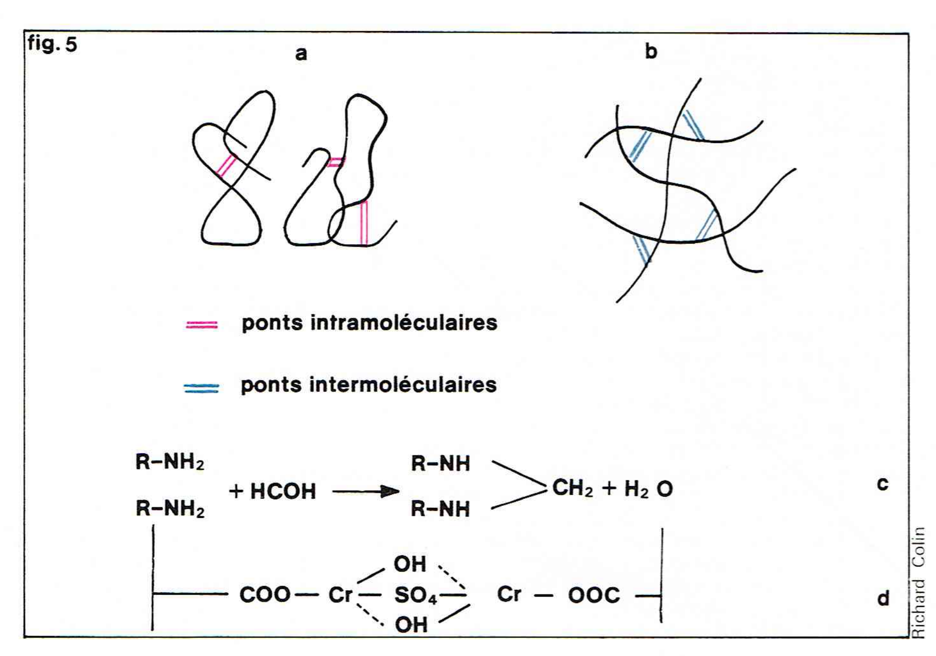
Comme la photoconductivité des halogénures d'argent n'est déclenchée que par des rayonnements d'une bande étroite de longueurs d'onde bleues et ultraviolettes, il est nécessaire d'étendre la sensibilité spectrale des couches photographiques à l'ensemble du domaine visible, pour leur donner une sensibilité aux couleurs identique à celle de la vision humaine. On y parvient par l'adjonction aux cristaux d'halogénures d'argent de colorants sensibilisateurs qui absorbent les radiations vertes, jaunes et rouges du spectre visible, c'est-à-dire toutes les radiations de longueurs d'onde plus grandes que celles absorbées par les halogénures d'argent. Fixés à la surface des cristaux, les colorants leur transmettent par résonance l'énergie provenant d'une exposition à ces rayonnements de grandes longueurs d'onde. Les colorants sensibilisateurs, composés chimiques caractérisés par de longues chaînes conjuguées d'ions carbone reliés alternativement par des liaisons simples et doubles, appartiennent soit aux systèmes de l'ion amidinium ou de l'ion carboxyle, soit au système amidique. On emploie le plus souvent des thiocarbocyanines, des mérocyanines et des composés apparentés à cette dernière classe de colorants.

En ce qui concerne le mécanisme de la sensibilisation spectrale, c'est-à-dire le transfert au cristal d'halogénure d'argent de l'énergie des grandes longueurs d'onde absorbée par le colorant, deux théories différentes peuvent être envisagées. Suivant la première, des électrons du colorant, excités par l'énergie absorbée, pourraient acquérir un niveau d'énergie suffisant pour atteindre la bande de conductivité et ainsi la mobilité nécessaire pour passer dans le réseau du cristal. Dans celui-ci, ils pourraient alors agir comme des photoélectrons libérés directement par un rayonnement d'ondes courtes, bleu ou ultraviolet. Toutefois, suivant une autre théorie, l'énergie de grandes longueurs d'onde captée par le colorant serait directement transférée au cristal pour y agir sur les niveaux énergétiques des électrons comme l'énergie absorbée par le cristal lui-même.

### *Le liant de la couche*

La **gélatine** est le liant des couches sensibles. Produit animal, elle n'a pas encore pu être remplacée par un produit synthétique. En effet, aucun de ses substituts ne rassemble toutes ses propriétés, si favorables au procédé photographique classique. D'abord, la gélatine joue au cours de la fabrication des émulsions photographiques le rôle de colloïde protecteur : elle enrobe les cristaux pendant leur croissance et les maintient ainsi dans les dimensions microscopiques requises, tout en empêchant leur coalescence. Contenant des composés sulfurés dont la présence pendant la précipitation des cristaux d'halogénures d'argent conduit à l'inclusion dans leur réseau d'ions soufre, la gélatine augmente indirectement, mais de façon considérable, la sensibilité des couches. Elle est capable, d'autre part, de donner dans les produits terminés des couches très minces, uniformes et à surfaces sans défauts, ayant à l'état sec un indice de réfraction très proche de celui des supports des films en esters de cellulose. Immergées dans l'eau, ces couches se gonflent et se montrent alors très perméables aux solutions aqueuses, permettant ainsi le développement et les autres traitements en milieu aqueux. Enfin, après la formation des images, les couches de gélatine, de surface uniforme et brillante, semi-mate à grain ou mate, sont entièrement stables en conservation illimitée.

Les gélatines photographiques sont préparées à partir d'os de bovins ou de peaux de porcs. Dissoute dans l'eau chaude, la gélatine forme une solution colloïdale qu'un abaissement de la température en dessous de 35 °C fait prendre en gelée. Chimiquement, la gélatine est une protéine, à molécules en longues chaînes composées d'assemblages d'acides aminés qui définissent son caractère amphotère : elle change d'ionisation suivant




▲ *Figure 5 : le tannage de la gélatine des couches photographiques s'effectue soit à l'intérieur de molécules de gélatine par des* ponts intramoléculaires (a), *soit entre les molécules par des* ponts intermoléculaires (b) *; suivant le type de tannant, ces pontages sont réalisés soit par des fonctions méthyléniques* (c), *soit par des ions métalliques, par exemple sous forme de ponts de chrome* (d).

le pH du milieu et réagit ainsi en milieu acide par ses fonctions amine, mais en milieu alcalin par ses fonctions carboxyliques. Ce comportement intervient dans les traitements photographiques au cours du tannage des couches, nécessaire pour leur conférer la solidité voulue pendant leur séjour dans les solutions des traitements. Ainsi, le tannage par des aldéhydes, par établissement de liaisons tant inter- qu'intramoléculaires entre les fonctions amine, ne peut se faire qu'à pH élevé, de l'ordre de pH = 10,0, tandis que le tannage par des aluns, formant des pontages similaires entre les fonctions carboxyliques, exige un milieu acide (*fig.* 5).

### Composés formateurs des images

Le deuxième élément fondamental des couches photographiques est formé par les composés chimiques chargés de former les images constituées par des colorants. Dans les films et papiers classiques, ces composés sont des *coupleurs*, réagissant au cours du développement avec les produits d'oxydation des agents développateurs pour former les colorants des images. Dans les matériaux pour vues instantanées, par contre, ce sont soit des *colorants-développateurs*, soit des libérateurs des colorants contenus dans des couches voisines des couches sensibles. Dans les produits donnant des images monochromes sans couleur, c'est-à-dire en noir et blanc, ces composés, inutiles puisque l'image est constituée par l'argent réduit des cristaux sensibles, ne sont évidemment pas inclus dans les couches.

Suivant la couleur à former, les coupleurs, *a priori* incolores, sont constitués différemment. Ceux qui donnent les colorants cyan sont en général méthiniques, appartenant à la classe des phénols. Les coupleurs des colorants magenta sont des composés méthyléniques hétérocycliques, surtout des pyrazolones ; et les coupleurs formant des colorants jaunes, à chaînes ouvertes, ont aussi d'habitude une fonction réactionnelle méthylénique. Chacun de ces coupleurs est incorporé dans sa couche respective et donne le colorant par une réaction de condensation avec les développateurs de la classe des *p*-amino-N, N-dialkylanilines, oxydés par le développement des cristaux d'halogénures d'argent insolés au cours de l'exposition. Puisqu'il est essentiel que chaque colorant soit formé exclusivement dans sa couche respective, il faut éviter toute migration des coupleurs entre les couches. Cela est réalisé soit par l'introduction du coupleur dans la gélatine de sa couche sous forme de fines goutelettes d'une solution dans un solvant organique lourd, soit par l'alourdissement du coupleur à l'aide de longues chaînes aliphatiques.

Les colorants-développateurs des films pour vues instantanées ne sont rien d'autre que des colorants appropriés, de couleurs cyan, magenta et jaune, portant sur leurs molécules des fonctions développatrices du type hydroquinone. Avant l'exposition et le développement, ils sont donc libres de migrer à travers les couches du film négatif, tandis que l'oxydation de l'hydroquinone par le développement des aires exposées conduit à leur fixation dans leurs couches respectives. Les images négatives sont ainsi retenues, chacune dans sa couche, mais les compléments de colorants constituant les images positives peuvent diffuser librement vers la couche réceptrice mordancée pour y former l'image définitive. Dans le cas de libérateurs de colorants, par contre, ces derniers, immobilisés avant l'exposition et le développement dans leurs couches respectives, sont libérés dans les aires exposées par l'action conjointe des produits d'oxydation du développateur et d'un composé alcalin sur la chaîne qui relie à l'origine le colorant à son liant. Ainsi libérés, les colorants migrent, comme dans tous les procédés de transfert de colorants, vers la couche réceptrice mordancée pour y rester fixés.

## Formation et propriétés de l'image latente

### Mécanisme de la formation de l'image latente

Les couches sensibles, exposées dans les appareils photographiques à l'image optique formée par l'objectif, conservent celle-ci par une transformation chimique définitive. Invisible, ce premier enregistrement est appelé image latente, puisqu'il constitue le premier pas de la formation ultérieure de l'image visible et définitive par le développement et les autres traitements. L'image latente est constituée d'agglomérations de quelques atomes d'argent, réduits au sein des cristaux d'halogénures d'argent par les radiations actiniques. Nous l'avons vu, celles-ci apportent aux électrons de valence l'énergie nécessaire pour atteindre la bande de conductivité et se mouvoir librement à travers le cristal. Piégés alors sur les impuretés constituées par des ions soufre inclus dans le réseau cristallin, ils attirent des ions interstitiels d'argent et les neutralisent. L'agrandissement des pièges par la présence d'un premier atome d'argent ainsi déposé contribue à capter d'autres électrons, qui attirent à leur tour d'autres ions argent interstitiels jusqu'à la formation d'une image latente stable. La première réaction de sa formation est donc électronique,

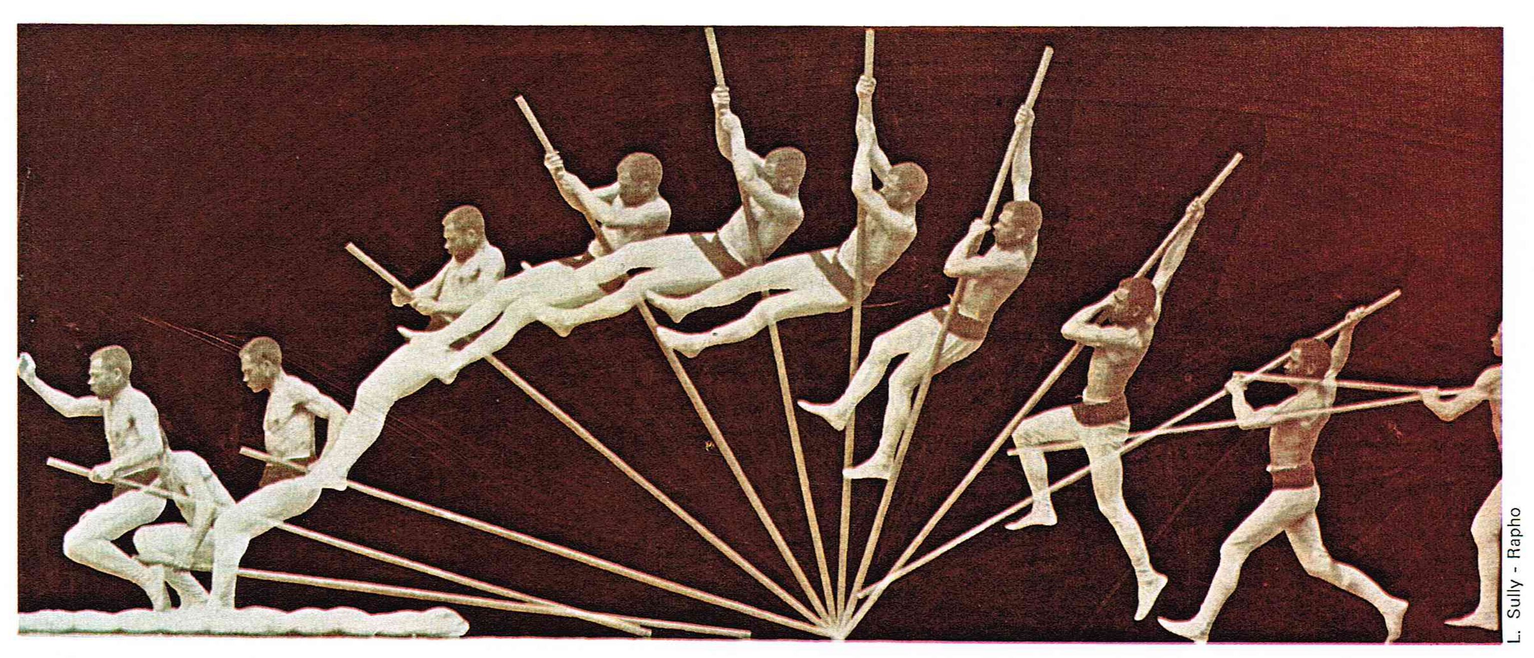
(1) $$Br^- + h\nu \rightarrow Br + e^-$$

et la deuxième, ionique,

(2) $$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag^\circ$$

Le rôle fondamental des ions soufre pour la sensibilité photographique a été reconnu dès 1925 par le chimiste S. E. Sheppard, qui réussit alors à identifier les composés sulfurés contenus dans la gélatine. Le mécanisme général de la formation de l'image latente par les deux réactions, électronique et ionique, a été formulé en 1938 par R. W. Gurney et N. F. Mott dans le cadre de leurs recherches sur les réactions électroniques dans les cristaux ioniques.

Suivant les conditions d'exposition, l'image latente se forme à la surface ou à l'intérieur des cristaux d'halogénure d'argent, et elle consiste soit en un petit nombre d'agglomérats d'atomes relativement importants, soit en de très nombreux agglomérats de petite taille. Comme elle a un rôle catalytique à jouer pour amorcer, au cours du développement, la réduction complète des cristaux, l'image latente doit nécessairement être disposée à leur surface pour être accessible au révélateur. Toutefois, les images latentes internes ne sont pas sans action, en particulier lorsque le révélateur contient des solvants des halogénures d'argent qui donnent accès à l'intérieur des cristaux par leur dissolution graduelle. Ce dernier mécanisme est couramment utilisé, par exemple dans le développement par inversion, qui donne directement des diapositives ou des épreuves d'après celles-ci. D'autre part, la dimension des images latentes agit surtout sur leur conservation. Lorsqu'elles résultent d'une exposition habituelle, de l'ordre d'un cinquantième de seconde, les images latentes sont de dimensions suffisantes pour posséder une excellente stabilité, même dans des conditions de température et d'humidité relative peu favorables à leur conservation pendant des durées très variables. D'autres expositions, soit très longues à faible éclairement, soit à des éclairs intenses et ultracourts, peuvent former des


L. Sully - Rapho

images latentes se conservant moins bien. La connaissance de ces propriétés spécifiques des images latentes permet aux fabricants de donner aux émulsions photographiques des propriétés exactement adaptées à chaque cas particulier d'utilisation.

### *Effets dus aux défauts d'intégration de l'énergie rayonnante absorbée*

Par ailleurs, la distribution et la structure des images latentes sont à l'origine de divers comportements parfois étonnants des couches photographiques, dus à des défauts d'intégration de l'énergie apportée par l'exposition. Parmi ces effets, celui qui a le plus d'importance pratique est la non-observation de la réciprocité de la durée de l'exposition et du niveau de l'éclairement de la couche. En effet, suivant la loi de Bunsen-Roscoe, le rendement pondéral d'une réaction photochimique est indépendant de la vitesse de formation du produit de réaction et ne dépend que de la quantité globale du rayonnement absorbé. Par conséquent, la masse M du produit de la réaction photochimique est proportionnelle au produit du flux incident actif $\Phi$ par la durée de son action $t$,

(3) $$M = k\Phi t, \quad \text{ou} \quad t = \frac{M}{k\Phi}$$

La valeur du flux et la durée de son action étant inversement proportionnelles, cette loi porte aussi le nom de « loi de réciprocité ». Or, elle n'est valable que pour une réaction photochimique primaire, telle que la libération par un rayonnement d'électrons dans les cristaux d'halogénures d'argent, mais elle ne s'applique plus ni au piégeage de ces électrons, qui ne dépend que de la présence d'ions soufre dans les cristaux, ni de l'attraction d'ions argent interstitiels par les électrons piégés. On désigne le défaut de réciprocité entre la valeur du flux et la durée de son action, qui en résulte, comme « défaillance de la loi de réciprocité » ou, en abrégé, *effet de réciprocité*. Ces effets se manifestent surtout lors d'expositions très longues à faible éclairement, ou extrêmement courtes à très fort éclairement. Dans le premier cas, il n'y a pas assez d'électrons libérés simultanément pour former des images latentes de taille suffisante pour être stables, et celles-ci se décomposent par l'agitation thermique normale du milieu avant l'arrivée de nouveaux électrons et d'autres ions argent. Dans le cas d'un afflux rapide et trop violent d'électrons, en revanche, le nombre de pièges disponibles est insuffisant pour les accueillir tous, et un certain nombre d'entre eux ne peut participer à la formation d'images latentes. Dans les deux cas, il y a perte d'énergie, et le meilleur rendement de l'exposition n'est donc réalisé qu'à un niveau d'éclairement intermédiaire et un temps de pose moyen. Comme les produits photographiques sont conçus pour être utilisés dans ces conditions habituelles, les effets de réciprocité passent en général inaperçus et n'interviennent guère que dans les cas d'expositions longues, mais aussi dans certaines circonstances particulières comme des reproductions d'écrans d'oscilloscopes et de télévision, ou des éclairs ultracourts.

Lors du fractionnement d'une exposition en une succession de poses courtes, l'effet de réciprocité donne lieu à un autre phénomène, appelé *effet d'intermittence*. En effet, l'ensemble de $n$ poses courtes de durée $t$ chacune donne en général un résultat qui diffère de celui d'une pose unique par la valeur de leur produit $n \cdot t$; à faible éclairement, l'interruption répétée de l'exposition accroît la probabilité de la désintégration, par l'agitation thermique, des images latentes en cours

***▲▼ Deux photographies montrant la décomposition du mouvement; elles sont réalisées par impressions successives sur la même partie de la pellicule.***


H. Dukkers - Camera Press - Parimage

de formation, mais, à éclairement très élevé, lorsque l'afflux des photo-électrons est trop rapide, les interruptions périodiques laissent à un nombre supplémentaire d'ions argent interstitiels le temps nécessaire à leur neutralisation. L'intermittence de l'exposition peut donc entraîner soit un affaiblissement, soit un renforcement du résultat photographique, qui dépend évidemment aussi de la fréquence des interruptions de l'exposition.

D'autres effets photographiques rencontrés dans la pratique sont *l'effet Clayden*, désensibilisation d'une couche par une exposition très courte d'énergie élevée, une exposition à des rayons X, ou même une contrainte mécanique; *l'effet Herschel*, constitué par l'effacement d'une image latente par une deuxième exposition à un rayonnement de grandes longueurs d'onde, rouge ou jaune-orangé; et la *solarisation*. Résultant de la réhalogénation des images latentes superficielles par l'excès des halogènes libérés au cours d'une exposition trop importante, la solarisation donne lieu à un résultat photographique inférieur à celui dû à une exposition plus faible, mais optimal. Il ne faut pas confondre la solarisation avec l'effet Sabattier consistant en une inversion partielle des images, accompagnée d'une accentuation des contours, souvent aussi appelée « solarisation » dans la littérature photographique artistique ou pratique. On connaît de nombreux autres effets photographiques dont le rôle est à présent plutôt historique; toutefois, leur étude scientifique a largement contribué à la connaissance approfondie des propriétés de l'image latente.

## *Formation des images définitives par les traitements photographiques*

On appelle traitements photographiques la succession d'opérations qui fait apparaître les images enregistrées par l'exposition sous forme invisible. Au cours du développement, ou bien on forme, dans les procédés classiques, les colorants composant les images dans leurs couches respectives, ou bien on fixe, dans les procédés de vues instantanées, des colorants préexistants dans une seule couche réceptrice suivant leur répartition dans les images. Dans le procédé monochrome en noir et blanc, les images résultent de la seule absorption de la lumière par l'argent réduit au cours du développement. Des traitements complémentaires sont encore nécessaires dans tous les procédés pour fixer définitivement et pour rendre utilisables les images ainsi obtenues.

### *Le développement*

Les ions argent des cristaux photosensibles des émulsions photographiques, ayant cédé un de leurs électrons aux ions halogénures des cristaux, se trouvent normalement dans leur état oxydé. Le but du développement est de réduire entièrement en argent ceux des cristaux qui ont été insolés pendant l'exposition, et de former par cette réaction les colorants des images. Comme la réduction des ions argent par le révélateur est très lente, on l'accélère dans les cristaux exposés en faisant appel à l'action catalytique de l'image latente qui sépare les cristaux insolés de ceux qui sont restés à l'abri de l'exposition. La réduction entière des cristaux insolés est obtenue par une réaction d'oxydoréduction, résultant du déplacement de l'équilibre entre les deux couples oxydoréducteurs [halogénure d'argent-argent] et [agent développateur-agent développateur oxydé].

Dans le procédé classique, l'oxydation de l'agent développateur, concomitante de la réduction des ions argent, fournit alors la fraction des molécules de colorants qui résultent de la réaction de copulation du développateur oxydé avec les coupleurs. Dans les procédés de vues instantanées, par contre, ou bien les produits d'oxydation des colorants développateurs fixent les images négatives dans leurs couches respectives et les distinguent ainsi des colorants constituant les positifs en migrant vers la couche réceptrice pour y être fixés, ou bien les produits d'oxydation d'un agent développateur classique libèrent les colorants ancrés dans leurs couches, en oxydant leurs chaînes de fixation, pour leur permettre également de migrer vers la couche réceptrice mordancée. En résumé, la formation des images par le développement résulte de deux réactions fondamentales : la première, la réduction en argent des cristaux sensibles insolés, fournit du développateur oxydé, et la deuxième donne lieu soit à la formation de colorants par la réaction du développateur oxydé avec les coupleurs, soit à la fixation ou à la libération de colorants préexistants dans les couches, également par des réactions dues au développateur oxydé.

La première de ces deux étapes, la réduction entière en argent des cristaux insolés, n'est pas autre chose que la continuation et l'achèvement de la réduction, amorcée au cours de l'exposition par celle de quelques ions argent. L'énergie apportée par l'exposition est minime, toutefois elle ne peut suffire qu'à marquer les cristaux insolés par l'image latente, constituée par les agglomérations minuscules d'atomes d'argent. Pour réduire rapidement des cristaux entiers, il faut une énergie plus importante; celle-ci est apportée par la solution de révélateur qui, considérée sous cet angle, n'est rien d'autre qu'un immense réservoir d'électrons. Sans catalyseur, le transfert aux cristaux des électrons du révélateur est lent, freiné par la couche résiduelle d'ions négatifs adsorbés à la surface des cristaux à la fin de leur précipitation. Les petits amas d'atomes neutres de l'image latente interrompent l'uniformité de cette couche de charges négatives et permettent ainsi aux électrons du révélateur d'approcher des cristaux. La perte de ces électrons, extraits de l'agent développateur, donne lieu à son oxydation,

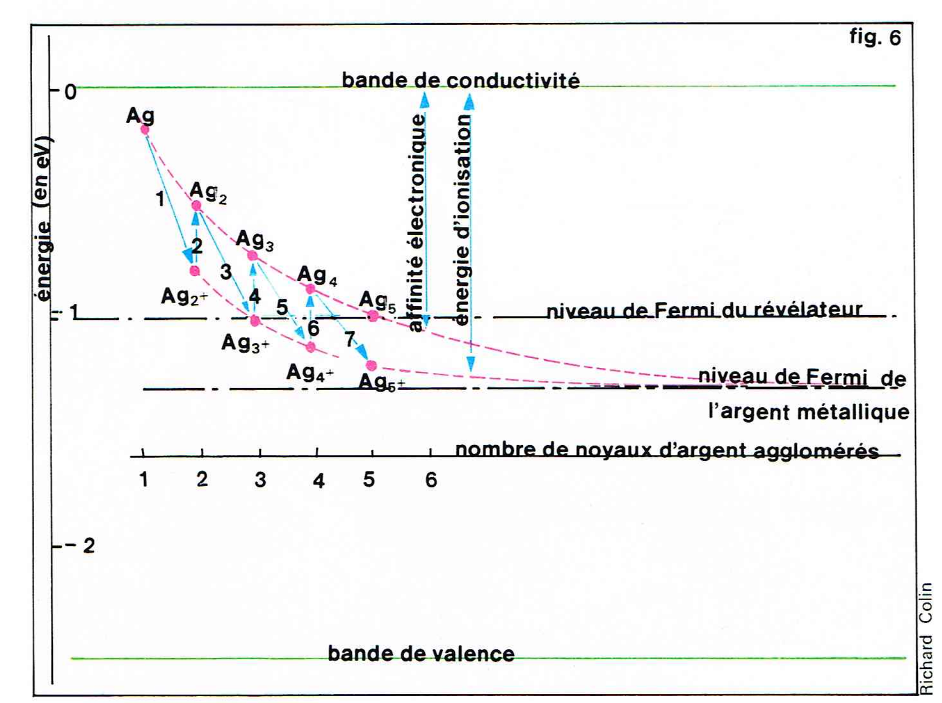
**(4)** $$D_{réd} \rightarrow D_{ox} + e^-$$

et elle est suivie par la réduction des ions argent à l'intérieur des cristaux,

**(5)** $$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag°$$

Une hypothèse sur le mécanisme intrinsèque de ces réactions, formulée par F. Trautweiler, montre bien le rapport étroit entre l'image latente, due à l'exposition, et l'image visible, formée au cours du développement (*fig.* 6). Suivant la théorie atomique, un des niveaux énergétiques des ions du réseau cristallin, le niveau de Fermi, est par définition celui dont une moitié seulement est remplie d'électrons. Les ions des agents développateurs ont également un niveau de Fermi, défini de la même façon, mais de valeur énergétique différente. Ainsi, lors de la mise en contact de cristaux non insolés avec la solution de révélateur, ces niveaux se compensent; il s'établit ainsi un gradient stationnaire de potentiel à l'interface cristal-révélateur, qui empêche la réduction rapide des cristaux. Les images latentes des cristaux insolés, par contre, créent localement à leur surface un potentiel plus faible que celui du niveau de Fermi des ions développateurs et frayent ainsi la voie aux électrons du révélateur pour la réduction des ions argent. Cette réduction, s'accélérant au fur et à mesure de la formation de nou-

▼ ***Figure 6 :***
**schéma de Trautweiler.**
***Cette représentation des niveaux d'énergie de la formation de l'image latente et du développement en photographie met en évidence leur nature commune, au cours des réductions successives de l'halogénure d'argent par l'exposition et le développement.***



veaux atomes d'argent, est autocatalytique; elle constitue donc effectivement la continuation accélérée de la formation de l'image latente par l'exposition.

Après cette première étape du développement, le produit d'oxydation de l'agent développateur, formé à l'emplacement des cristaux insolés, réagit *in situ* — nous l'avons vu — soit avec les coupleurs pour former par copulation les colorants de la synthèse trichrome des images, soit pour fixer ou libérer des colorants de cette synthèse, préexistant dans leurs couches respectives. L'argent formé pendant le développement n'est utilisé que dans la photographie en noir et blanc, mais n'a aucune utilité en photographie en couleurs : il faut alors l'éliminer dans les traitements qui suivent le développement.

Certaines utilisations des surfaces sensibles photographiques ne nécessitent que des images monochromes, différenciant uniquement des valeurs de luminance, par exemple en radiographie médicale et industrielle, en photogravure, et dans de nombreuses applications scientifiques. Il n'est alors pas nécessaire de former des colorants, puisque l'argent réduit par le développement des cristaux insolés, finement dispersé et de couleur noire, absorbe suffisamment la lumière. Dans ce cas, on applique donc le simple développement en noir et blanc, qui a été seul employé pendant le premier siècle d'existence de la photographie, avant la généralisation de la photographie en couleurs. Les cristaux inutilisés sont ensuite éliminés par dissolution dans une solution d'hyposulfite, appelée fixateur.

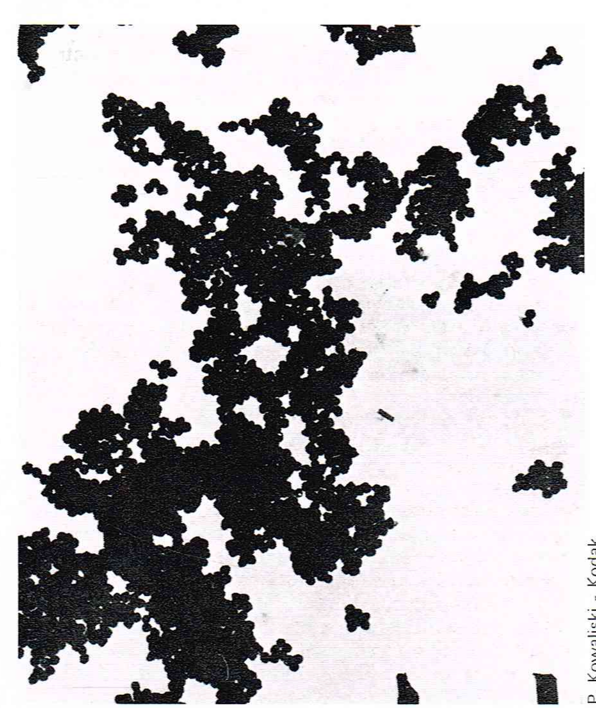
Pour la formation des images argentiques, on peut utiliser l'argent provenant soit de la réduction des cristaux, soit d'ions argent présents dans la solution de révélateur; la première méthode est appelée développement direct, et la seconde développement physique. Comme les solutions de révélateur contiennent en général une certaine quantité de solvants des halogénures d'argent, suffisamment d'ions argent s'y trouvent en solution pour que les deux types de développement aient lieu simultanément.

Puisque le rendement de l'opération photographique en noir et blanc dépend de la seule absorption optique de l'argent déposé au cours du développement, la morphologie de ce dépôt joue un rôle important. Or, l'argent formé par le développement direct est très dispersé, tandis que celui provenant du développement physique est compact; le premier absorbe donc beaucoup plus de lumière que le second. Ce n'est en effet pas la masse de l'argent réduit qui définit le rendement des images photographiques en noir et blanc, mais son pouvoir couvrant, exprimé par le rapport de la densité optique du dépôt d'argent à sa masse pondérale.

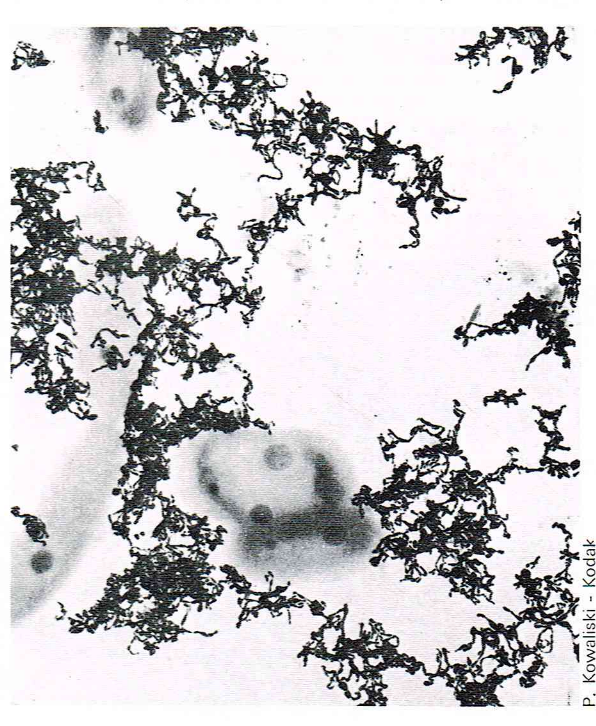
Dans la grande majorité des utilisations de la photographie, les images formées par l'exposition dans les appareils et par leur développement sont des négatifs qui servent ensuite au tirage d'épreuves positives. Il est souvent utile, toutefois, de disposer d'une image positive sur le film exposé à la prise de vue. Dans les matériaux classiques, cela est réalisé par un traitement *par inversion*, et directement par le transfert des colorants des images positives dans les produits pour vues instantanées. Dans le développement classique par inversion, l'image négative résultant de la prise de vue est d'abord développée en noir et blanc, et le résidu des halogénures d'argent des couches, proportionnel aux images positives, sert alors, après avoir été voilé par une forte exposition uniforme, à former par un développement chromogène les colorants de ces images. Dans les procédés de vues instantanées, l'inversion est réalisée — nous l'avons vu — par le seul transfert des colorants des images positives dans une couche réceptrice mordancée, où ils se fixent définitivement en réagissant avec le mordant. La solution de traitement, contenant une quantité minime, correspondant juste à la superficie des épreuves, de soude caustique dans un solvant visqueux, est étalée, pendant l'avance des épreuves, par les rouleaux formant un laminoir à l'intérieur de l'appareil de prise de vue.

Pour les vues instantanées en noir et blanc, on emploie le traitement par diffusion-transfert. Immédiatement après la prise de vue, la couche sensible négative est mise en contact avec la couche réceptrice par l'intermédiaire de la couche visqueuse alcaline de traitement. Celle-ci contient un solvant des halogénures d'argent, et permet aux ions argent en solution de migrer vers la couche réceptrice qui ne contient que des germes de précipitation dans un liant, et d'y former l'image positive.

Du point de vue pratique, la solution de révélateur comporte toujours quelques éléments de base bien déterminés. Le premier — essentiel — de ces éléments est évidemment le réducteur ou *agent développateur*. Dans le développement chromogène classique, c'est un composé de la classe des *p*-amino-N, N-dialkylanilines, et, en noir et blanc, un di-ou monohydroxybenzène ou une phénylène mono- ou diamine, composés portant en général des groupements supplémentaires. Dans les procédés de vues instantanées, le réducteur constitue une fonction d'un colorant et forme alors un colorant-développateur, ou il est tout simplement un des agents développateurs classiques, chargé de libérer, dans sa forme oxydée, les colorants ancrés dans les couches. Les autres éléments de la solution de révélateur sont : *l'ion sulfite* ou d'autres composés réducteurs, destinés à empêcher l'oxydation prématurée de l'agent développateur; des *composés alcalins* fixant le pH nécessaire



P. Kowaliski - Kodak



P. Kowaliski - Kodak

◀ *L'argent résultant du* **développement physique** *est formé de particules compactes (à gauche) alors que l'argent dû au* **développement direct** *est déposé en filaments (à droite).*

▶ *Vue de détail d'une fleur de tulipe; l'un des pétales a été enlevé afin de montrer l'appareil reproducteur.*

aux réactions du développement et les *composés anti-voiles*, constitués soit par des halogénures solubles, soit par des composés organiques donnant également avec les ions argent des sels peu solubles.

Les révélateurs chromogènes ne contiennent que le minimum strictement nécessaire de sulfite, puisque celui-ci, en réagissant avec les coupleurs, bloquerait leurs fonctions réactives et diminuerait ainsi les quantités de colorants formés dans les images. Les composés alcalins couramment employés sont des carbonates, des phosphates ou des hydroxydes alcalins. Les composés anti-voiles agissent soit sur le voile intrinsèque des émulsions, dû au développement de cristaux non insolés, soit sur le voile dû à une activité trop grande du révélateur. Ces deux actions protectrices sont surtout exercées par les ions halogénures qui, adsorbés sur les cristaux, recouvrent les inclusions superficielles d'ions étrangers et des aspérités ou dislocations superficielles, qui pourraient amorcer des réductions en l'absence d'images latentes et ainsi créer du voile.

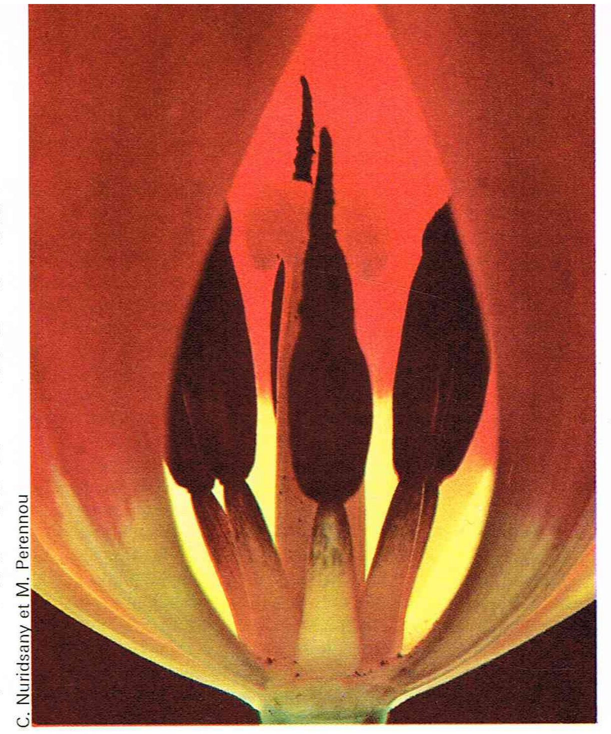
### Finition des traitements

L'image développée, il est encore nécessaire d'éliminer tout résidu non utilisé de sensibilité à la lumière et aussi ceux des composés ou éléments qui, formés pendant le développement, ne contribuent pas aux images. Dans le procédé classique, il s'agit donc de traiter les films et papiers pour enlever, d'une part, les halogénures non utilisés, et, d'autre part, l'argent formé pendant le développement. Ces deux éliminations sont effectuées séparément ou en même temps. Dans le premier cas, l'argent recouvrant les images est d'abord réhalogéné par une solution de blanchiment contenant des ions halogénures en présence d'un oxydant, par exemple du ferricyanure de potassium, et l'ensemble des halogénures est ensuite éliminé par un fixateur, constitué par une solution d'hyposulfite de sodium ou d'ammonium, solvants des halogénures d'argent. Dans le deuxième cas, les deux opérations sont effectuées dans une seule solution, appelée blanchiment-fixage.

Dans les procédés de vues instantanées, les images fixées par mordançage dans les couches réceptrices ne seraient pas stables si elles restaient au contact de la solution alcaline de traitement. Or, celle-ci imbibe toutes les couches à l'intérieur des sandwichs constituant les épreuves; on incorpore donc dans ces produits une couche comportant la quantité juste nécessaire d'acide pour neutraliser entièrement le résidu de solution alcaline subsistant après le traitement, ce qui permet d'assurer aux images une conservation parfaite. Dans les traitements en noir et blanc, il suffit, pour fixer les images, d'éliminer après le développement le résidu d'halogénure d'argent par un fixage dans une solution d'hyposulfite, suivi d'un lavage qui ne laisse subsister dans les images aucun composé résiduel, nocif à leur conservation.

## Propriétés physiques des images photographiques

Selon le but que se propose une image photographique, on juge ses qualités techniques de façon différente. Dans la majorité des cas, lorsqu'il ne s'agit que d'avoir un enregistrement documentaire de l'impression visuelle de personnes, de lieux, de sujets, on regarde l'épreuve dans son ensemble à une certaine distance et on en fait une évaluation — toute considération esthétique mise à part — d'après la vraisemblance de la reproduction des couleurs et des valeurs. Dans d'autres cas, lorsqu'on désire avoir un document très précis sur des objets comportant de petits détails, par exemple des bijoux, des tissus, des caractères d'imprimerie, des vues d'observation aérienne, on regarde l'image de près en exigeant une excellente reproduction de toutes les finesses et un maximum de netteté. Tous ces jugements peuvent être classés et évalués soit d'après des observations faites par des juges humains, obtenues à l'aide de méthodes bien étudiées et d'exploitation statistique des résultats, soit par des mesures effectuées avec des instruments : les premiers sont subjectifs, les seconds objectifs. Il importe de considérer séparément ces deux aspects de la qualité physique des épreuves. En premier



C. Nuridsany et M. Perennou

lieu, il est nécessaire de fonder la reproduction photographique, que ce soit pour les couleurs, les valeurs ou les détails, sur la fidélité physique des images par rapport aux scènes ou sujets représentés. Si certains ajustements à ce premier objectif sont nécessaires pour satisfaire aux exigences subjectives des utilisateurs, il faut évidemment que le procédé photographique en tienne compte. Toutefois, ces légères modifications de la reproduction physiquement fidèle, aussi importantes qu'elles soient pour satisfaire le goût des utilisateurs, n'ont qu'une importance secondaire.

### Reproduction des couleurs et des valeurs

L'évaluation de la fidélité objective de la reproduction des couleurs et des valeurs fait appel à deux sciences étroitement liées : la colorimétrie et la photométrie. La seconde, bien plus ancienne que la mesure de la couleur, a été créée pour comparer entre elles des sources lumineuses. Or, l'impression de luminosité visuelle peut avoir son origine dans la source elle-même si elle se trouve dans le champ de vision, ou dans des surfaces d'objets réfléchissant ou transmettant cette lumière. Ainsi, la photométrie est directement employée pour la mesure de la reproduction des valeurs; de même, il est évident que l'évaluation de la reproduction des couleurs est fondée sur la colorimétrie, technique photométrique plus générale, puisque toute lumière perçue est colorée.

### Paramètres photographiques

Les paramètres employés dans les mesures des images sont photométriques et sensitométriques. (Les unités photométriques font partie des unités légales de mesure et sont définies, par conséquent, dans le *Journal officiel*. Elles sont résumées dans une brochure officielle intitulée *Unités de mesure*.) Parmi les premiers, les plus importants sont (*fig.* 7) :

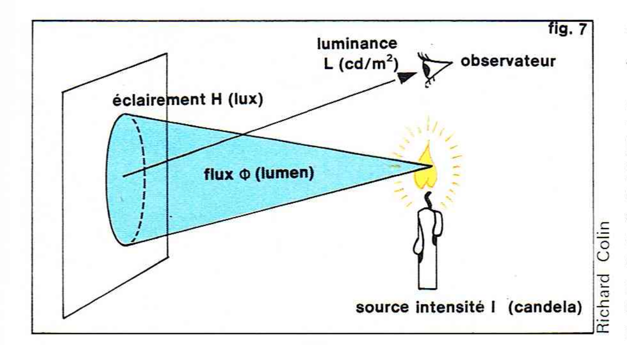
l'*intensité* I d'une source lumineuse, exprimée en candelas (cd);

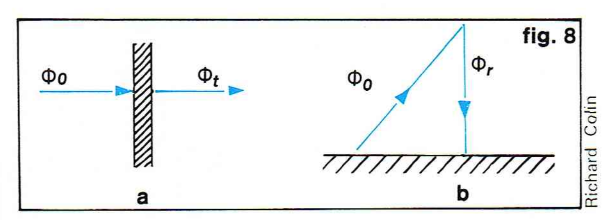
le *flux* $\Phi$, émanant de cette source, mesuré en lumens;

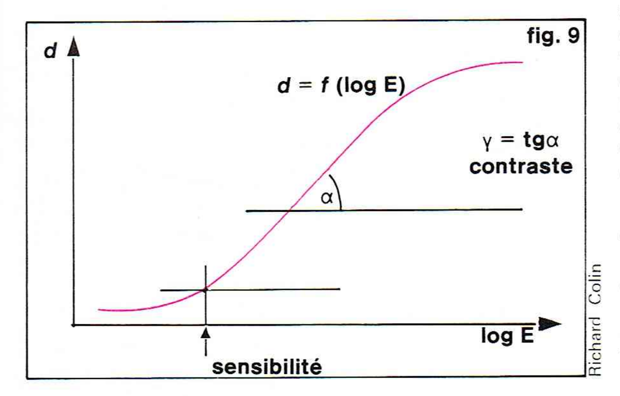
l'*éclairement* H. (En photométrie, ce paramètre est désigné par E; cette lettre étant réservée en photographie à l'exposition, on désigne pour cette utilisation spécifique l'éclairement par la lettre H.) Il résulte de l'incidence de ce flux sur des surfaces, exprimé en lux;

et la *luminance* L, en candelas par mètre carré, mesure de l'impression visuelle de luminance de chacun des points compris dans le champ de vue.

Les paramètres sensitométriques, spécifiques de la photographie, sont avant tout caractérisés par celui qui définit l'effet sur le flux de la transmission ou de la réflexion par un dépôt absorbant : c'est la *densité optique*, $d = \log 1/T$ (*fig.* 8), la densité par transparence avec la transmittance $T = \Phi_t/\Phi_0$, rapport du flux transmis au flux incident, ou $d_r = \log 1/R$, la densité par réflexion, définie de façon similaire, avec la réflectance $R = \Phi_r/\Phi_0$.




La densité optique est employée pour définir le *contraste* et la *sensibilité*, paramètres fondamentaux de la photographie permettant d'exprimer en quantités mesurables les propriétés pratiques des couches sensibles exposées et traitées. Leur réponse dépend d'un grand nombre de paramètres d'actions très variables, et il n'est pas possible de l'exprimer par une relation analytique. On indique par conséquent les caractéristiques d'un film ou papier, après un traitement donné, par une relation empirique, appelée *la courbe caractéristique* et représentée par un graphique (*fig.* 9) qui montre l'évolution de la densité en fonction du logarithme de l'exposition, $d = f$ (log E). Appliquée à l'origine à l'ensemble du spectre visible et, par conséquent, seulement à la photographie en noir et blanc, cette relation a évidemment été adaptée à la photographie en couleurs, par son application séparée aux trois tiers du spectre visible dont les sommes des radiations correspondent aux couleurs primaires de la reproduction trichrome, c'est-à-dire au rouge, au vert et au bleu.

Dans les fonctions $d = f$ (log E), la pente de la courbe à chaque niveau de densité, exprimée par sa tangente, $\gamma = \text{tg}\ \alpha = \frac{\text{d}\ d}{\text{d}\ \log \text{E}}$, représente le *contraste de la reproduction photographique*. Celui-ci indique le degré de la variation dans les images soit de la couleur, soit de la luminosité. Le *contraste* $\gamma$ est un paramètre photographique qui donne une appréciation chiffrée et explicite de la fidélité de la reproduction : trop élevé, il donne lieu à des couleurs crues et à des lumières et ombres heurtées, et très faible, il adoucit l'apparence des objets représentés et peut alors donner à leurs contours un aspect peu défini. Pour cette raison, le contraste de la partie moyenne de la courbe caractéristique, en général presque droite sur une certaine longueur, est considéré comme le premier des deux principaux paramètres sensitométriques. Le deuxième est la *sensibilité sensitométrique* des surfaces sensibles. Elle est exprimée par la valeur de l'exposition — représentée par sa valeur logarithmique, puisque l'axe des abscisses est gradué en log E — qui correspond à la réalisation d'une densité donnée au seuil de la courbe d'une échelle de gris, densité choisie suivant l'utilisation photographique du produit. Pour la photographie générale dans son application habituelle, cette densité est égale à $d = 0{,}1$ au-dessus du voile, c'est-à-dire au-dessus de la densité optique du matériau non exposé, mais développé et traité. Pour être définie par un seul chiffre, la sensibilité est déterminée d'après une progression de luminances neutres, représentée par les trois courbes caractéristiques entièrement superposées. Le contraste peut être mesuré de cette même façon, et il est alors important que la coïncidence des trois courbes soit réalisée sur toute leur longueur.

### *Bases de la reproduction des couleurs*

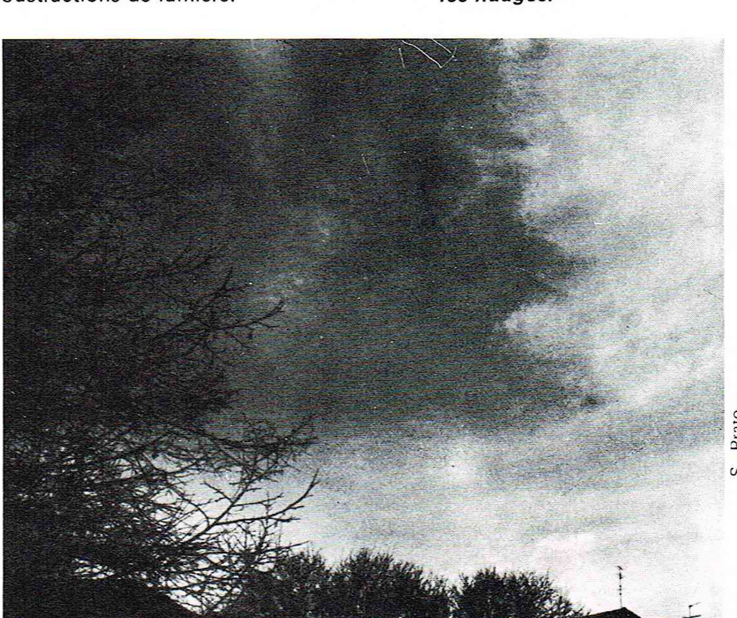
Dans tous les procédés photographiques actuels, les couleurs sont reproduites en deux étapes fondamentales. La première est celle de la *sélection des couleurs*, où chaque couleur de la scène originale est répartie en ses trois composantes primaires. La sélection trichrome est réalisée par l'exposition de trois couches, sensibles respectivement au rouge, au vert et au bleu. La seconde étape est celle de la *synthèse trichrome ;* dans celle-ci, on emploie chacun des enregistrements de la sélection des couleurs à la définition des quantités des trois couleurs primaires dans la reproduction. Cette synthèse est réalisée — nous l'avons vu — à l'aide de colorants. La couche qui a enregistré, à la prise de vue en négatif, la fraction rouge du spectre visible définit en chaque point de l'image positive la quantité de colorant cyan (bleu-vert) ; la couche qui a enregistré la fraction verte définit de la même manière dans le positif les quantités de colorant magenta ; et la troisième couche négative, sensible à la fraction bleue du spectre, définit les quantités de colorant jaune dans l'image positive. Les teintes des colorants sont ainsi pratiquement complémentaires aux sensibilités spectrales des couches négatives qui définissent leurs quantités dans les images, et on appelle l'ensemble de ce système la *reproduction soustractive*, puisque les couleurs primaires formant les images résultent de l'absorption de lumière par les colorants, c'est-à-dire de soustractions de lumière.

◀ ***Figure 7 :** les principaux* **paramètres photométriques** ***employés en photographie.***

◀ ***Figure 8 :** principe de la transmittance d'une lame plane parallèle* **(a)** ***et norme de la mesure de la réflectance*** **(b).**

◀ ***Figure 9 :** fonction* **d = f** ***(log*** **E)** ***donnant la*** **courbe caractéristique** ***d'un procédé photographique ; à l'aide de cette courbe empirique, on détermine les*** **paramètres sensitométriques** ***de*** **sensibilité** ***et de*** **contraste.**




▼ ***Deux photos d'un même paysage prises respectivement avec un filtre rouge (à gauche) et un filtre jaune (à droite) ; ces deux filtres ont la propriété d'obscurcir le ciel et de faire ressortir les nuages.***



C. Bevilacqua



C. Bevilacqua



C. Bevilacqua

▲ ***De ces trois clichés représentant le même objet, le premier présente un excès de magenta, le deuxième un excès de vert, mais le troisième est correct.***

La synthèse photographique trichrome n'est pas autre chose que l'application du principe de Maxwell. Suivant celui-ci, les sensibilités spectrales des trois couches négatives doivent être proportionnelles aux fonctions de mélanges des couleurs primaires de la reproduction, définies par les trois colorants de la synthèse. En effet, la première étape de la reproduction, la sélection trichrome, a été subdivisée par Maxwell de la façon suivante : on choisit d'abord les trois lumières colorées destinées à servir ultérieurement à la synthèse; on détermine leurs fonctions de mélanges, c'est-à-dire la répartition de leurs quantités respectives, longueur d'onde par longueur d'onde, nécessaires à reproduire les couleurs du spectre; on conçoit alors le système photographique de telle sorte que ses trois couches sensibles aient des sensibilités spectrales proportionnelles à ces fonctions de mélanges. En ce qui concerne la reproduction finale, Maxwell l'effectue par synthèse additive en projetant sur un écran, à l'aide de trois projecteurs, les trois positifs tirés d'après les négatifs de sélection, en lumières rouge, verte et bleue, c'est-à-dire par des additions des trois lumières primaires. Ce principe reste entièrement valable pour la synthèse soustractive, qui n'en est qu'une autre application.

La réalisation pratique d'une reproduction trichrome parfaite nécessite des compléments aux opérations de base, constituées par la sélection et la synthèse. D'abord, il est nécessaire d'ajuster le résultat final pour corriger la correspondance qui n'est pas totalement complète entre les sensibilités spectrales réelles des couches négatives et les fonctions de mélanges. Puisque, par son principe, l'égalisation colorimétrique trichrome ne recouvre jamais le domaine entier des couleurs, les fonctions de mélanges ont des parties négatives. Suivant le principe de Maxwell, il faudrait donc que les sensibilités spectrales eussent aussi des parties négatives, mais cela ne peut évidemment pas être réalisé. D'autre part, les colorants n'agissent pas chacun exclusivement sur l'un des tiers du spectre visible, mais ils absorbent aussi dans les domaines spectraux de leurs propres couleurs. On élimine les imperfections de la reproduction trichrome qui pourraient résulter de ces deux données pratiques par des méthodes dites de « masques », réalisées par l'emploi de coupleurs colorés, de coupleurs relâchant au moment de la copulation des inhibiteurs de développement, ou par des effets de traitement entre les couches, appelés effets interimages. Ces derniers ajustent, dans chacune des images positives, les quantités du colorant de cette couche en fonction des deux autres images.

La reproduction colorimétrique fidèle ainsi obtenue est ensuite ajustée à la moyenne des exigences des utilisateurs des images photographiques. Ceux-ci les jugent en effet dans la plupart des cas en mesure absolue, puisqu'ils n'ont presque jamais la possibilité de comparer directement l'épreuve à la scène originale, et parce que les conditions d'éclairage de ces deux perceptions sont presque toujours entièrement différentes. L'observateur évalue donc la fidélité de la reproduction soit en se fiant à sa mémoire, soit, s'il n'a jamais vu le sujet photographié, ce qui est très fréquent, en jugeant l'image suivant ses préférences personnelles. Les procédés photographiques sont donc toujours légèrement ajustés pour donner aux couleurs le plus fréquemment rencontrées, telles que la teinte chair, le vert de l'herbe et des feuillages, le bleu du ciel, l'aspect des *couleurs préférées dans les reproductions*, déterminées scientifiquement par des évaluations subjectives soignées.

### *Reproduction des valeurs*

En plus de la reproduction parfaite des teintes, il faut aussi que la progression des valeurs, c'est-à-dire des échelles de luminosité, soit optimale dans les images. Elle dépend du contraste, et, aussi, indirectement, de la reproduction des couleurs, puisque la luminosité est comprise dans les paramètres fondamentaux de la couleur, qui sont, d'une part, la chromaticité, constituée par la teinte et la saturation, et, d'autre part, la luminosité, dont dépend précisément la reproduction des valeurs. Pour une bonne reproduction photographique, la luminosité et ses progressions sont même plus importantes que la reproduction satisfaisante des chromaticités, en particulier dans les lumières et dans les ombres. Dans les premières, les aires les plus claires, donc les plus visibles, un contraste relativement élevé est essentiel. S'il est insuffisant, par exemple à la suite d'une surexposition, les lumières manquent de détail et de couleur et ne correspondent pas à l'impression visuelle de la scène originale. Il est nécessaire, de même, que les luminances des valeurs sombres des images soient bien échelonnées et distinguées, pour rehausser aussi, par un effet de contraste simultané, la luminance des parties claires. Dans les teintes moyennes, par contre, une progression lente des luminances donne des reproductions photographiques plus satisfaisantes qu'un contraste élevé. L'ensemble de ces répartitions des luminances dépend du choix judicieux de la répartition des éclairages dans la scène originale de l'exposition, soigneusement adaptée au procédé et au sujet, et, dans le cas du procédé négatif-positif classique, de la qualité du tirage.

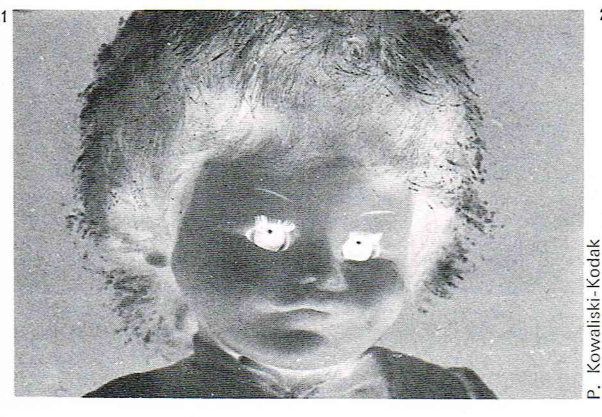
A ces conditions d'une bonne reproduction des valeurs s'ajoutent encore les conditions de l'observation des images. Celles-ci sont aussi importantes que la qualité des images elles-mêmes : il faut qu'elles soient favorables pour permettre à l'observateur d'apprécier entièrement leur contenu. Il faut que l'image soit suffisamment et uniformément éclairée, sans reflets dissimulant des parties de son contenu. Les luminances couramment rencontrées dans les conditions habituelles d'observation d'épreuves photographiques varient en effet considérablement : dans une pièce ensoleillée, les lumières peuvent réfléchir jusqu'à 9 000 cd/m$^2$, tandis que le soir, à l'éclairage de lampes à incandescence, la luminance des parties claires d'une épreuve peut être très faible : 25 cd/m$^2$ seulement. C'est pourquoi la norme française NF-S-20 007 recommande, pour l'examen critique d'images photographiques, surtout pour des usages professionnels, un éclairement dans le plan de l'épreuve de 1 500 $\pm$ 500 lux, donnant environ 500 cd/m$^2$ aux lumières des épreuves. Pour la projection de diapositives, la luminance moyenne de l'écran, surtout dans une pièce obscurcie, peut être plus faible, mais elle doit être au moins de l'ordre de 50 cd/m$^2$.

Une bonne reproduction des valeurs est aussi indispensable dans les applications techniques et scientifiques de la photographie. L'exemple le plus typique est celui de la radiographie, où les utilisateurs ont besoin d'une progression favorable des luminances, pour pouvoir évaluer correctement tous les détails de leur enregistrement qui, en fait, ne comporte à l'origine pas de détails visibles. Lorsque, dans des enregistrements photographiques documentaires, l'échelle des luminances est plus étendue que celle que permet de reproduire le procédé choisi, on peut la comprimer ou la déformer pour obtenir une image présentant clairement la totalité du phénomène; ces déformations de l'échelle des valeurs peuvent être réalisées soit par des méthodes photographiques (tirages masqués ou autres), soit par l'action d'une calculatrice sur un premier enregistrement vidéo-électronique par exploration lignée.



L. Brun-Rapho

1

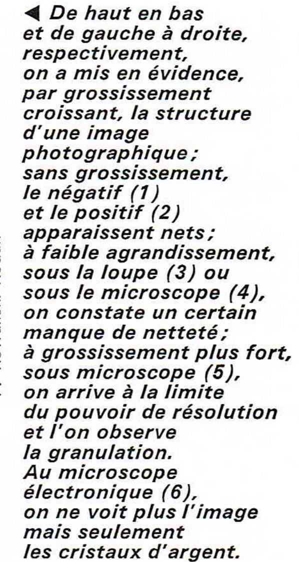


P. Kowaliski-Kodak

2

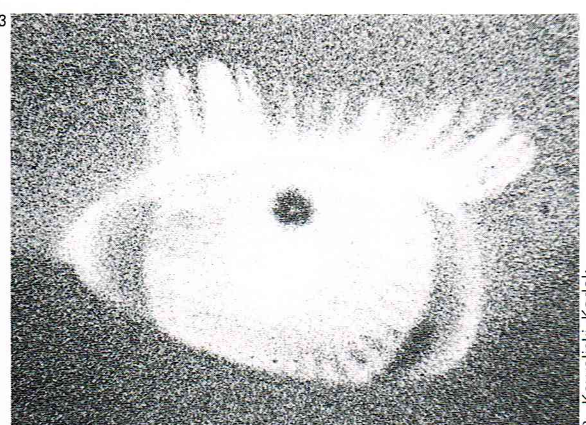


P. Kowaliski-Kodak



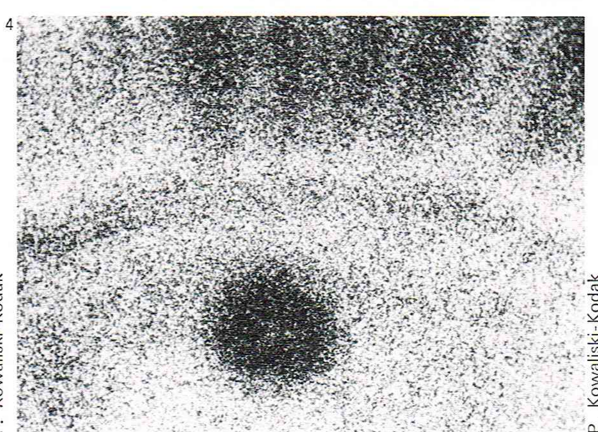
◀ *De haut en bas et de gauche à droite, respectivement, on a mis en évidence, par grossissement croissant, la structure d'une image photographique ; sans grossissement, le négatif (1) et le positif (2) apparaissent nets ; à faible agrandissement, sous la loupe (3) ou sous le microscope (4), on constate un certain manque de netteté ; à grossissement plus fort, sous microscope (5), on arrive à la limite du pouvoir de résolution et l'on observe la granulation. Au microscope électronique (6), on ne voit plus l'image mais seulement les cristaux d'argent.*

3



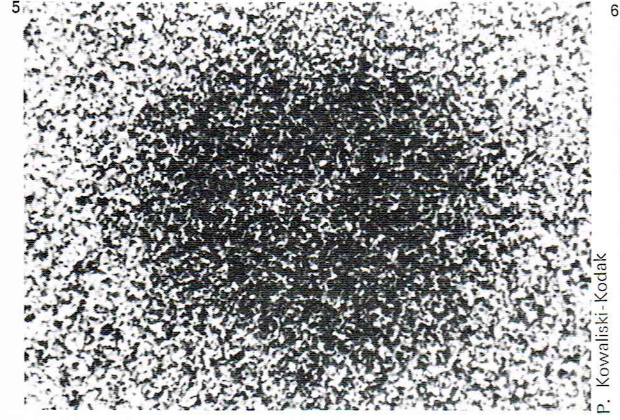
P. Kowaliski-Kodak

4



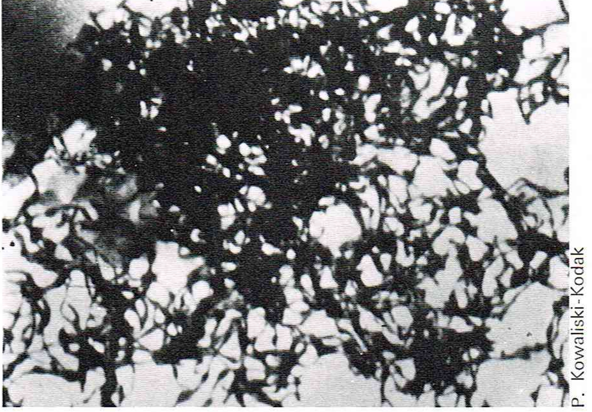
P. Kowaliski-Kodak

5



P. Kowaliski-Kodak

6



P. Kowaliski-Kodak

## Reproduction des détails

Lorsqu'elle est observée dans les conditions habituelles, une image photographique de bonne qualité montre tous les détails du sujet ou de la scène originale. Observés de plus près, ces détails paraissent moins distincts et, avec un grossissement croissant, ils sont de plus en plus influencés par la structure propre de l'image photographique. D'une part, celle-ci montre à l'échelle microscopique une certaine discontinuité due à sa composition en minuscules taches de colorants ou d'argent, et, d'autre part, la netteté des contours des sujets reproduits n'est pas illimitée et diminue avec l'agrandissement de l'image.

### Granulation, pouvoir de résolution et netteté

La structure des images photographiques provient, d'une part, de la diffusion de la lumière à l'exposition et des cheminements des constituants du révélateur et de ses produits de réaction à travers les couches pendant le développement, et, d'autre part, de la composition des images terminées : ce sont des amas microscopiques de particules de colorants, ou d'argent dans le cas du noir et blanc. Par conséquent, on rencontre, dans la reproduction des détails par un matériau photographique, les trois éléments suivants : d'abord la discontinuité de la structure d'image, appelée granularité, visible seulement à très fort grossissement, qui donne lieu au phénomène subjectif de la *granulation ;* ensuite la limite de la distinction et de la visibilité de fins détails à très fort agrandissement, appelée *pouvoir de résolution* de la couche photographique ; et enfin l'apparence plus ou moins définie des contours des sujets représentés, appelée *netteté*. La qualité physique d'une image étant considérée, en général, dans son ensemble, on la résume, pour la structure d'image, dans la propriété unique de *définition* qui englobe les trois paramètres subjectifs de granulation, de résolution et de netteté.

Dans l'utilisation courante de la photographie, à faible et à moyen grossissement, la *granulation* passe entièrement inaperçue. Elle intervient plutôt dans les applications particulières où les détails doivent être correctement représentés malgré un fort grossissement des images.

La *résolution*, elle aussi, est surtout sensible dans ces applications, par exemple dans des reproductions techniques de sujets comportant de fins détails périodiques, tels que des tissus, des plantes et des insectes, des œuvres d'art, ou des objets rapprochés dans des vues fortement agrandies, comme les détails d'un paysage dans des vues aériennes ou spatiales. Le *pouvoir de résolution* est exprimé par le nombre de traits au millimètre qui peuvent tout juste être distingués ; il dépend

◀ *Page ci-contre en bas, trois médecins observant des radiographies ; dans le cas de la radiographie, une bonne reproduction des valeurs (c'est-à-dire de l'échelle de luminosité) est nécessaire afin d'appréhender des détails qui ne sont pas directement visibles.*

▶ *Figure 10 : effet de la diffusion latérale des produits de la réaction du révélateur sur la netteté des images ; à la limite des plages claires et sombres, il se forme, par des effets de voisinage, des « lignes de bord » et de « liséré » qui peuvent avoir un effet très favorable sur la netteté apparente.*

ainsi des conditions d'observation et de l'appréciation de l'observateur. Par conséquent, le pouvoir de résolution est un phénomène subjectif, mais il décrit la propriété importante de la séparation de très petits détails de façon univoque ; c'est ainsi un critère de qualité appréciable.

Le troisième paramètre de la reproduction du détail, la *netteté*, également subjective, est une propriété des images photographiques qui joue un grand rôle. Comme pour la granulation, l'effet sur la netteté du comportement des matériaux sensibles est négligeable dans leur utilisation habituelle, où intervient plutôt le flou optique résultant d'erreurs de mise au point ou de mouvements du sujet ou de l'appareil pendant l'exposition.

### *Influence de la structure des matériaux et des traitements*

Dans le procédé classique négatif-positif, la reproduction des détails dépend surtout de la qualité du négatif. A l'exception d'un petit nombre d'applications professionnelles de la photographie, celui-ci est en général de petites dimensions, et tous les défauts éventuels de sa structure risquent ainsi d'apparaître dans les épreuves agrandies. La qualité des détails dans les films négatifs dépend d'abord de la *diffusion de la lumière* dans les couches sensibles, résultant de leur structure non homogène. L'indice de réfraction des cristaux d'halogénures d'argent étant bien plus élevé que celui de la gélatine, une couche photographique vierge a l'aspect d'un milieu laiteux, apparence qu'accentue encore la diffusion de la lumière par les gouttelettes de coupleur également contenues dans la couche. Toutefois, les remarquables progrès de la fabrication des couches sensibles permettent à présent d'éliminer presque entièrement les effets de cette diffusion, d'abord par la réalisation de cristaux extrêmement petits et néanmoins ultrasensibles, et ensuite par des épaisseurs très faibles des couches, contribuant à réduire au minimum le chemin optique à travers celles-ci. Enfin, l'action indésirable de la lumière diffuse est éliminée par l'inclusion dans les couches de faibles quantités de colorants absorbants. D'autre part, tous les moyens du tirage des épreuves par agrandissement, tant dans les agrandisseurs que dans les tireuses semi-automatiques et automatiques, sont conçus pour qu'aucun détail consigné dans le négatif ne soit perdu. Les mêmes perfectionnements que ceux contenus dans les films négatifs sont évidemment incorporés dans les films inversibles.

Le deuxième facteur qui agit sur la structure d'image des négatifs et des diapositifs est la *diffusion des constituants du révélateur* et de leurs produits de réaction pendant le développement (*fig.* 10). En principe, ces échanges ne devraient avoir lieu que perpendiculairement aux couches, et seulement à l'intérieur de chaque couche, sans empiéter sur les couches voisines. Or la diffusion a lieu assez uniformément dans tous les sens et agit ainsi sur la reproduction du détail et la couleur des contours. L'effet des échanges latéraux dans les couches entre les produits actifs du révélateur (agent développateur, composés alcalins) et les produits de réaction dus au développement (agent développateur oxydé, ions halogénures, ions hydrogène) se manifeste surtout aux limites entre des aires qui sont fortement exposées et d'autres qui ne le sont pratiquement pas, ou peu. Il se crée alors le long de ces frontières de minces bords, plus denses que les aires fortement exposées, et des lisérés moins denses que celles qui sont peu exposées. L'ensemble de ces effets de voisinage contribue à une amélioration de la netteté. D'autre part, la diffusion latérale, lorsqu'elle dépasse les limites assez étroites de cette action utile, peut avoir des effets défavorables sur la netteté et la résolution. On la limite donc en donnant une structure appropriée aux couches. On peut par exemple corriger entièrement ces effets indésirables par les coupleurs DIR, formateurs des colorants des images qui, au moment de leur réaction avec les produits d'oxydation du développateur (c'est-à-dire pendant la copulation), relâchent des composés inhibiteurs du développement. Entourant les cristaux exposés pendant leur développement, ces composés empêchent un étalement de la formation des colorants et donnent ainsi aux négatifs une netteté et une résolution exceptionnelles, permettant leur agrandissement pratiquement illimité pour tous les usages pratiques.

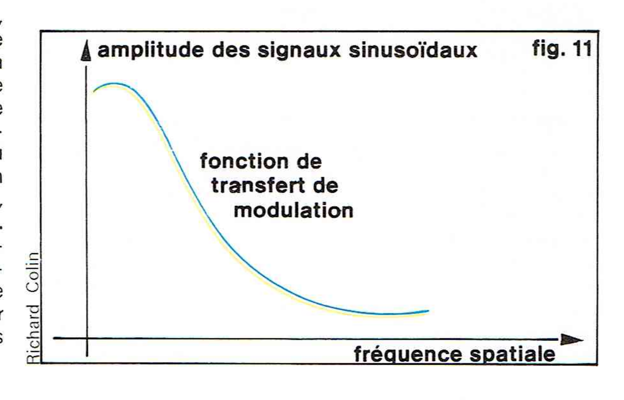


Dans les matériaux pour vues instantanées, les effets de la diffusion de la lumière dans les couches négatives n'agissent pratiquement pas sur la structure des images, puisque celles-ci ne sont pas agrandies. Par contre, la diffusion des composés du traitement n'intervient pour ces procédés que dans une faible mesure, le transfert des colorants ou des ions argent entre les couches négatives et la couche réceptrice constituant le tirage du positif par contact. La diffusion latérale des constituants des images est inhibée, toutefois, dans ces produits, par la minceur des couches et la vitesse des réactions mises en jeu, en particulier par la puissance du mordançage dans la couche réceptrice qui immobilise instantanément les colorants et empêche ainsi leur diffusion latérale.

### *Les fonctions de transfert de modulation et d'autocorrélation*

Prise dans le sens le plus général, une image photographique n'est pas autre chose qu'un enregistrement graphique de données. Comme toute autre reproduction, cet enregistrement ne peut évidemment pas être entièrement parfait. Sa qualité est limitée — nous venons de le voir — par des propriétés inhérentes au principe du procédé photographique, qui permettent un transfert optimal, mais imparfait, de l'information. Considérée sous cet aspect, la reproduction photographique peut donc être incluse dans le domaine général du transfert de l'information et traitée, comme les autres méthodes de ce transfert, par analyse harmonique.

Jusqu'à présent, nous avons considéré séparément chacun des trois paramètres de la structure des images photographiques. Ce mode d'approche provient des méthodes de mesure normalement appliquées : la *granularité* est mesurée par la détermination de la variation microscopique moyenne de densité à l'aide d'une ouverture ronde de diamètre donné ; le *pouvoir de résolution* est mesuré à l'aide d'une mire de traits parallèles à bords nets, par la limite de sa perception en reproduction de plus en plus réduite ; et la corrélation objective de la netteté, l'*acutance*, est évaluée d'après la qualité de la reproduction d'une distribution d'éclairement entièrement nette le long de la frontière entre une plage éclairée et une plage sombre. Or, en transfert d'information, on détermine la qualité du résultat en mesurant la perte




▶ *Figure 11 : la* fonction de transfert de modulation *de la reproduction photographique ; cette fonction est équivalente à un spectre de transmission et permet de juger de la qualité de la reproduction photographique ; la rapidité de la perte d'amplitude en fonction de la fréquence spatiale donne une indication précise de la* netteté, *et la dernière fréquence sinusoïdale reproduite indique le* pouvoir de résolution.

d'amplitude de signaux sinusoïdaux, sachant qu'ils conservent toujours leur forme initiale, bien qu'ils aient été affaiblis par le transfert.

Au lieu de mesurer séparément le pouvoir de résolution et la netteté, on effectue donc la copie de mires à distributions sinusoïdales de luminance, de fréquences successivement croissantes, et on constate sur l'image photographique les pertes d'amplitude pour chacune de ces fréquences. Portées sur un graphique en fonction de leurs fréquences spatiales, mesurées en cycles par millimètre, les amplitudes résiduelles de la reproduction donnent la *fonction de transfert de modulation* (*fig.* 11). Celle-ci, qui est en fait équivalente à un spectre de transmission, permet de juger de la qualité de la reproduction par le matériau ou procédé considéré : la rapidité de sa perte d'amplitude en fonction de la fréquence spatiale donne une indication précise de la netteté, et la dernière fréquence sinusoïdale reproduite indique le pouvoir de résolution, puisque, à cette limite, disparaît la distinction entre un signal d'entrée sinusoïdal ou en créneaux.

L'inclusion de la granularité dans le transfert d'information se fait à partir des mesures conventionnelles, c'est-à-dire à l'aide de la variation moyenne de densité d'une plage de dimension donnée, exposée à un éclairement uniforme et traitée. A partir de cet enregistrement de la granularité, on peut déterminer le degré de corrélation entre ses valeurs correspondant à des points séparés par des distances appropriées, choisies suivant le grossissement utilisé. La caractéristique ainsi déterminée de la granularité est l'autocovariance, qui donne, en fonction de la fréquence spatiale, la *fonction d'autocorrélation*, mesure de la granularité à l'aide de laquelle il est possible d'effectuer la liaison avec la fonction de transfert de modulation. On peut ainsi étudier sous une forme entièrement cohérente les trois aspects de la structure d'image des matériaux photographiques.

## Sensibilité photographique et contenu d'information

La microstructure d'une image photographique influence non seulement sa qualité, mais elle agit également — dans un sens plus général que la simple notion de sensibilité sensitométrique — sur la sensibilité de son enregistrement d'information. Vu sous l'angle de celui-ci, le but d'une photographie est en effet la conservation et la transmission de données, et on juge par conséquent sa sensibilité intrinsèque par l'évaluation de tous les facteurs qui agissent sur sa capacité d'emmagasinage et de transfert d'information.

### Sensibilité limite d'un système photographique

La sensibilité d'un système photographique est évidemment définie par ses éléments photosensibles, c'est-à-dire, dans le cas des systèmes photographiques fondés sur le système classique, par les halogénures d'argent. La limite ultime de leur sensibilité dépend de l'énergie minimale nécessaire pour constituer une image latente ; pour la déterminer, nous devons donc partir de la théorie de celle-ci. Un modèle de Hamilton, Spencer et Brady situe le mécanisme de l'image latente par rapport au niveau de l'énergie apportée par l'exposition. Le cristal non exposé contient — nous l'avons vu — des ions argent mobiles et des imperfections de surface physiques et chimiques. Chaque absorption d'un photon crée simultanément un électron et une « cavité » positive, captés aussitôt tous deux dans des pièges constitués par des imperfections appropriées du réseau cristallin. Un électron ainsi retenu dans un piège peu profond peut alors soit s'échapper à nouveau, soit être rejoint par un ion argent. S'il s'échappe, il peut être saisi par une cavité piégée elle-même, mais, s'il est rejoint par un ion argent, il approfondit le piège superficiel, et celui-ci attire alors un nouvel électron, qui fixe à son tour un autre ion argent. La répétition de ce cycle agrandit le piège jusqu'à une taille critique, suffisante pour catalyser ultérieurement le développement du cristal entier. Les divers centres fixes et les porteurs de charges mobiles agissent ainsi chacun dans une succession aléatoire d'événements. L'étude de ce processus par la méthode statistique dite de Monte-Carlo, effectuée parallèlement à des observations au microscope électronique, démontre qu'une exposition à intensité faible a plutôt tendance à ne créer qu'un centre isolé d'image latente par cristal, tandis que des niveaux plus élevés d'éclairement font augmenter le nombre des centres initiateurs de développement, dispersés à la limite suivant une distribution statistique de Poisson.

L'évaluation de la sensibilité limite, fondée sur ce mécanisme et sur ceux qui sont donnés par des théories du même type, conduit à la conclusion que les émulsions modernes exploitent entièrement l'énergie étonnamment faible apportée par l'exposition, et qu'une amélioration de l'efficacité quantique, même si elle était possible, conduirait inévitablement à une perte de la structure d'image par une granularité accrue et une diminution de la définition.

La limite de la sensibilité photographique dépend aussi, par ailleurs, de la nature du rayonnement qui apporte les éléments de l'information contenue dans l'image. Dans le cas de la lumière visible et des autres rayonnements auxquels on expose les couches sensibles, les messages qu'ils contiennent atteignent les couches par impacts séparés de photons ou de quanta non visibles. Par ailleurs, les microsignaux enregistrés dans une photographie sont aussi composés d'éléments séparés, constitués — nous l'avons vu — par des amas de minuscules nuages de colorants ou de « grains » d'argent qui forment un enregistrement discontinu. La sensibilité photographique dépend ainsi, d'une part, du nombre minimal de quanta capables de rendre développable un microcristal d'halogénure d'argent, et, d'autre part, de la lisibilité du signal malgré sa structure discontinue.

En ce qui concerne le premier de ces deux facteurs, il est à présent établi que quatre quanta seulement sont nécessaires par cristal pour permettre au révélateur d'amorcer le développement d'un cinquième environ des cristaux les plus sensibles d'un film négatif ou inversible rapide. Pour rendre développable la moitié des cristaux sensibles de ces couches, il faut de dix à vingt-cinq quanta par cristal, et pour que tous les cristaux soient rendus développables, il faut de dix à cent fois plus d'incidences de quanta.

Le deuxième facteur, la lisibilité des informations enregistrées, dépend évidemment du rapport qui existe entre leur importance et celle des variations aléatoires du fond, dues à sa nature discontinue. On qualifie ces dernières de variations de bruit — par analogie avec le bruit de fond en télécommunication —, et on considère qu'un signal enregistré est réel et détectable lorsque sa densité optique est au moins supérieure à l'écart-type des fluctuations statistiques de la densité uniforme du fond, variations résultant de la granularité de l'image.

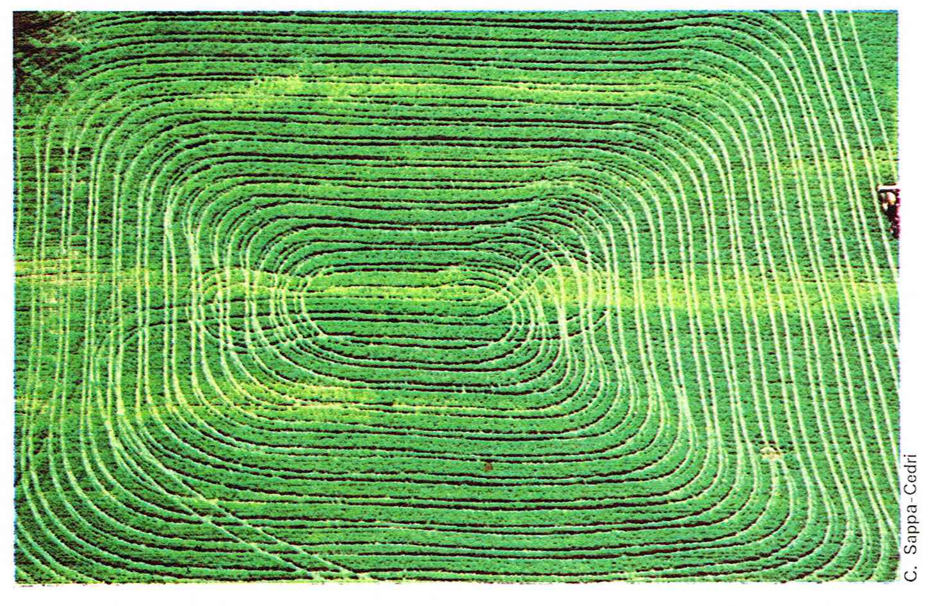
### Contenu d'information des systèmes photographiques

L'image photographique, considérée comme élément transmetteur d'information, est caractérisée par son contenu significatif ; c'est le rapport entre la probabilité de présence d'un signal dans l'image et la fréquence d'envoi de messages à partir de la scène photographiée. En ce sens, un détecteur photographique parfait saurait distinguer un signal du bruit qui l'accompagne ; il enregistrerait — nous venons de le voir — chacun des messages dès que son énergie serait supérieure à l'écart-type des variations statistiques du flux uniforme des photons ou quanta qui l'entourent. Or, un détecteur réel ne peut retenir qu'une fraction de ces messages ; par conséquent, son efficacité est définie par le rapport entre sa capacité de détection de signaux au milieu d'un flux continu de rayonnement ambiant et celle d'un détecteur parfait soumis aux mêmes conditions.

Cette définition correspond aussi à la constitution des couches photographiques : leurs récepteurs élémentaires, les cristaux d'halogénure d'argent, se comportent comme des récepteurs binaires, puisque, après exposition, ils ne peuvent se trouver que dans un des deux états : ou bien ils portent une image latente et contribuent alors à la transmission du message, ou bien ils restent vierges et disparaissent ultérieurement dans le traitement sans avoir participé au transfert de l'information. La *capacité d'information d'une couche photographique* est donc donnée par le nombre maximal de signaux qu'elle est capable d'enregistrer de telle façon qu'ils puissent ensuite tous être lus sans erreur.



F. Hidalgo-Top



C. Sappa-Cedri

***▲ En haut, photo truquée de la basilique Saint-Marc à Venise. En bas, photo aérienne d'un champ entre Vannes et La Roche-Bernard (Morbihan).***

Il peut arriver que des conditions défavorables de prise de vue, imposées et impossibles à corriger, par exemple en exploration spatiale, empêchent la représentation exacte de la scène à reproduire. On applique alors, pour extraire de ce premier enregistrement photographique un maximum d'information, des techniques particulières que l'on appelle des *traitements des images.* D'abord, les densités de chaque point de l'image originale imparfaite sont notées dans une calculatrice, par une exploration lignée similaire à celle de la télévision, et cet enregistrement est ensuite soumis à des corrections appropriées, choisies en fonction du mécanisme de dégradation ayant agi sur l'image.

Une des techniques récentes de traitement des images photographiques est celle du « noise-cheating », ou élimination du bruit. Une image prise par nécessité en éclairement très faible est souvent perturbée, en effet, par la présence d'une quantité élevée de signaux dus au bruit, presque aussi importante que celle due à l'image proprement dite. Pour retrouver dans cette image le maximum des signaux de la scène, non perturbés par le bruit, on emploie alors d'abord une ouverture d'exploration de diamètre relativement élevé. Ayant ainsi diminué le niveau du bruit, on explore l'image une deuxième fois avec une ouverture plus faible, d'un diamètre égal à la moitié de celui de la première. Suivant la théorie de la granulation, on réduit ainsi le bruit à un huitième de sa valeur initiale, et la restauration de l'image par la superposition des signaux, ainsi triés et appartenant à des niveaux d'intensité bien séparés, donne un résultat beaucoup plus détaillé que l'enregistrement original. Des vues de galaxies, à l'origine à peine visibles, ont ainsi été rendues presque entièrement lisibles.

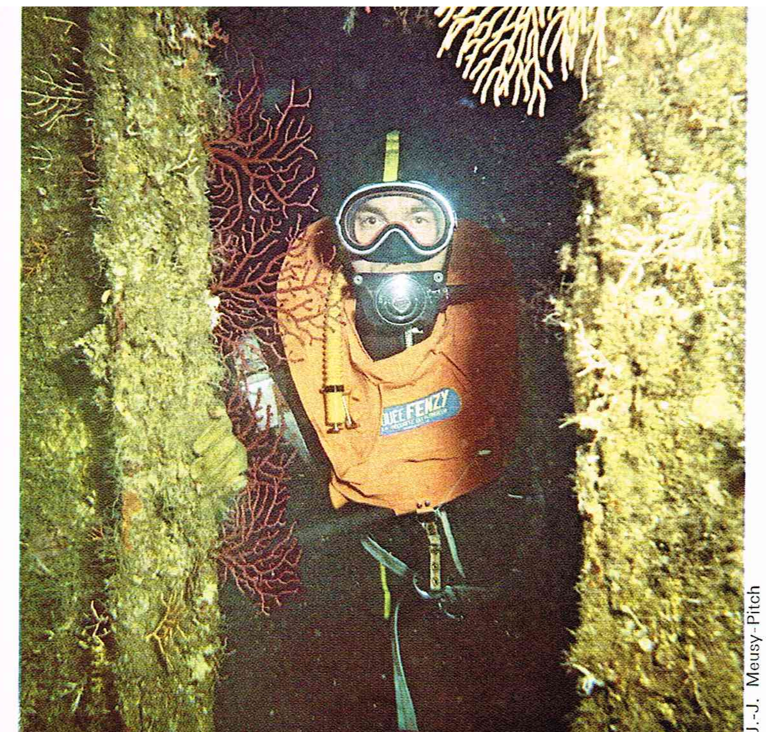
Une autre technique permet de corriger des manques de netteté par « nutation » : l'image originale est d'abord soumise à un mouvement de rotation locale de très petit diamètre, correspondant approximativement au flou original, et copiée ainsi. La soustraction des densités de cette copie floue de celles de l'enregistrement original restaure alors la netteté de celui-ci. Des méthodes dérivées de cette technique peuvent évidemment servir à éliminer des défauts différents des absences de netteté, par exemple par le choix d'un mouvement autre qu'une rotation pendant la copie, ou par des répétitions de ces mouvements.

Dans les applications de la photographie aux explorations à distance, la couleur des images peut servir à la mise en valeur de signaux ou détails peu visibles à l'origine. En augmentant leurs différences de composition spectrale, on peut faire ressortir des contours qui ne diffèrent pas assez en densité, ou on peut restaurer des détails par des superpositions de plusieurs images monochromes différentes. Il est possible, aussi, d'effectuer des traitements d'images photographiques par des tirages de plusieurs générations de copies d'un premier enregistrement, par exemple pour la détermination automatique de modifications locales, dans l'évolution des teintes des champs dans des exploitations agricoles, d'après des vues aériennes. En exploitation forestière, on emploie des films à couleurs d'images interverties et à sensibilités décalées vers l'infrarouge : dans un tel film, le film Kodak Ektachrome Infrarouge, employé à l'origine pour la détection d'installations d'intérêt militaire dissimulées par des peintures de camouflage, la couche du fond, sensible à l'infrarouge, donne l'image cyan (bleu-vert), la deuxième couche, sensible au rouge, donne l'image magenta, et la troisième couche, sensible au vert, donne l'image jaune. L'avantage des techniques purement photographiques est l'observation de la résolution originale de l'image, ainsi que de la géométrie relative des sujets représentés.

Le traitement des images photographiques en couleurs dans des calculatrices est couramment employé en astronomie et dans l'exploration spatiale. Une des techniques employées est celle des rapports des réflexions spectrales : on enregistre d'abord simultanément, à l'aide de trois caméras, des images de sélection à l'aide de filtres rouge, vert et bleu. Après un traitement très précis, ces images donnent par le calcul, en chaque point du sujet, les rapports du rouge au vert et du bleu au vert. En passant alors par le diagramme des couleurs de la Commission internationale de l'éclairage, on détermine, pour chacun de ces rapports des couleurs primaires, les valeurs correspondantes de quatre sources de couleurs qui servent à exposer des images traitées sur un nouveau film, rendues plus lisibles que les originaux.

## *Le rôle de la photographie dans le monde moderne*

Dans le premier chapitre de notre description, le résumé historique, nous avons pu suivre l'évolution de la photographie vers son rôle capital dans la vie moderne. En effet, la photographie est à présent un des éléments de la vie quotidienne de toutes les familles des pays évolués : aux États-Unis d'Amérique, par exemple, 90 % environ des petites filles au-dessous de quinze ans et 70 % environ des petits garçons de cet âge ont des appareils. En grandissant, ce sont les garçons qui sont plus attirés par la photographie, et environ 83 % la pratiquent entre quinze et vingt ans. En France, 70 % des utilisateurs des







appareils photographiques à chargement rapide ont moins de trente-cinq ans, et l'âge de la pratique de la photographie baisse constamment : en 1976, la moyenne d'âge des débutants s'est située autour de treize ans. En ce qui concerne la dépense attribuée à la photographie, elle s'élève aux États-Unis en moyenne à 75 F par année et par famille, et en Europe occidentale à un équivalent de 28 F environ. Dans les pays en cours de développement, cette dépense est nécessairement plus faible et n'atteint qu'une valeur approchant 1,80 F. Toutefois, le marché mondial s'accroît constamment. S'élevant en 1974 à 28 millions d'appareils fabriqués par an, il est estimé pour 1977, par une source japonaise, à 30 millions d'appareils, dont huit millions environ d'origine japonaise. En France, le parc total des appareils en état de fonctionner, en 1975, s'élevait à 15 millions d'exemplaires environ, répartis dans 58 % des foyers français. Par comparaison, la même année, 63 % des foyers français disposaient d'une voiture automobile au moins. La répartition par type d'appareils peut être jugée, en première approximation, par les nombres d'appareils vendus. En 1975, ces nombres s'élevaient en France, pour les appareils 24 × 36, à 13 %, et pour l'ensemble des appareils à développement instantané, à 27 %, mais ce sont visiblement les appareils à chargement rapide qui ont la plus grande faveur du public, puisqu'ils représentent 60 % de ce marché, s'élevant au total à plus d'un million et demi d'appareils. Ces appareils à chargement rapide servent d'ailleurs presque exclusivement à la prise de vue en couleurs.

Les chiffres totaux atteints montrent encore mieux l'importance prise par la photographie : suivant une statistique publiée aux États-Unis d'Amérique dans le plus récent rapport Wolfman, le nombre des photographies d'amateurs s'élevait aux U. S. A. en 1974 à 6 400 millions, dont 5 600 millions en couleurs, réparties en 4 300 millions d'épreuves et 1 300 millions de diapositives. A ces chiffres s'ajoute la quantité impressionnante de 1 400 millions de photographies noir et blanc et couleurs à développement instantané.

Si l'on inclut aussi dans ce marché photographique le cinéma d'amateurs en Super 8, on constate une croissance encore plus rapide : de 2,5 millions d'appareils fabriqués en 1974, il atteindra sans doute en 1977 le chiffre de 2,8 millions, dont environ 1,09 million d'origine américaine et 1,05 million d'origine européenne; en France, la vitesse d'extension de ce marché est remarquable : de 1,4 % des foyers qui pratiquaient en 1960 le cinéma d'amateurs, le chiffre est monté à 9 % jusqu'en 1976.

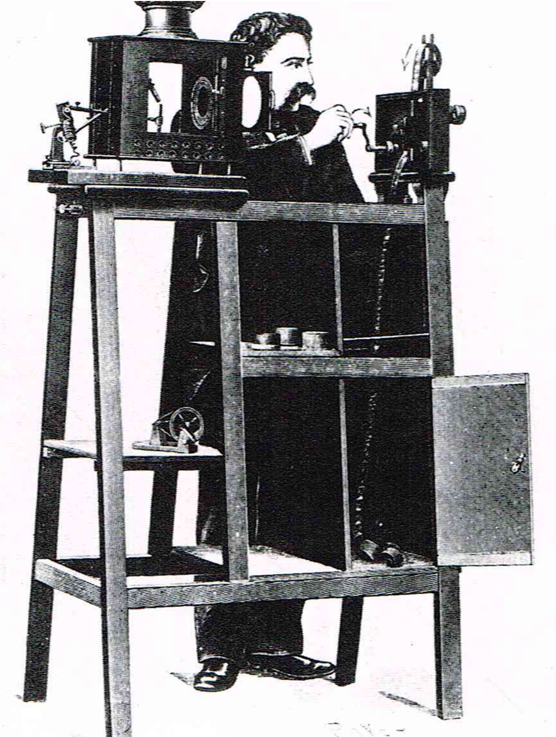
L'énumération de ces chiffres impressionnants ne donnerait qu'une image incomplète du rôle de la photographie si on omettait de mentionner les industries travaillant directement et indirectement pour elle. En effet, des ensembles très importants d'usines, réparties à travers le monde, sont consacrés à fabriquer des appareils et des surfaces sensibles, en Europe occidentale, aux États-Unis d'Amérique et au Japon. Ces énormes industries consomment des quantités très importantes de matières premières, parmi lesquelles de nombreux produits chimiques (polyesters, triacétate de cellulose, acide nitrique, argent, hyposulfites et autres), et de matériaux naturels, tels que les os et les peaux fournissant la gélatine des couches. Ainsi, les industries photographiques contribuent à l'animation d'un grand nombre d'industries non photographiques dont elles sont les premiers consommateurs. A ces industries s'ajoutent encore les industries consommatrices, telles que les usines de façonnage d'épreuves et de traitement de films, les usines de photogravure, les laboratoires cinématographiques et bien d'autres. La photographie ne constitue donc pas seulement un des éléments de nos activités quotidiennes, mais elle a pris une place telle qu'elle contribue à faire vivre une partie importante du monde moderne.

***▲ Deux vues sous-marines prises près de Marseille au niveau de l'épave du Liban. A gauche, le cliché normal; à droite, un effet photographique réalisé par le procédé Agfa-contour.***

***▼ La photographie est à présent un des éléments de la vie quotidienne dans les pays évolués; en 1976, la moyenne d'âge des débutants était située autour de 13 ans, et on considère que la dépense consacrée à la photographie en Europe occidentale est de 28 F environ par an et par famille (à gauche). Des ensembles importants d'usines sont consacrés à la fabrication d'appareils photographiques et de surfaces sensibles, notamment en Europe occidentale, aux États-Unis et au Japon (à droite, assemblage de pièces dans une usine Nikon au Japon).***





Archives Snark

Archives Snark

▶ *Deux documents anciens relatifs au cinéma ; à gauche, un exemplaire du cinématographe Lumière, appareil utilisé aussi en Angleterre lors des premières projections (Arch. Science Museum, Londres) ; à droite, une gravure extraite du* Petit Journal *(1912), montrant les dangers du reportage de guerre : deux opérateurs de cinéma échappent de peu à la mort.*

# LE CINÉMA

## *Panoramique sur le cinéma*

De technique brute, le cinéma est devenu un art qui, bien que souvent controversé, a su s'imposer au public au cours d'un processus extrêmement rapide, qui a vu son aboutissement dans la sphère hollywoodienne. L'évolution des techniques cinématographiques, qui n'a pas été sans influence sur le « cinéma-spectacle », a également permis d'utiliser le matériau filmique à d'autres fins professionnelles. C'est ainsi qu'aujourd'hui un très grand nombre d'activités sont illustrées et mises en valeur à l'aide du cinéma. Ces différentes illustrations font cependant appel à des techniques particulières, et il serait vain de vouloir les regrouper toutes sous une même affiche. Le seul « cinéma-spectacle » n'est pas exempt, lui non plus, d'une telle diversité : à côté des films classiques qui mettent en scène des décors et des personnages réels, on trouve des films d'animation dont les techniques sont également très variées : dessins animés, animations de marionnettes, dessins directement réalisés sur film, etc. L'évolution des techniques cinématographiques a également permis un essor considérable du cinéma d'amateur. Ainsi, de nos jours, convient-il de répertorier les différentes formes et utilisations du cinéma de la manière suivante.

* *Films destinés à l'exploitation commerciale dans des salles spécialisées*. Ces films sont produits, réalisés, distribués puis exploités selon des critères qui bien souvent relèguent le septième art au rang d'une industrie classique. Les moyens mis en œuvre pour les réaliser sont très différents : si le coût moyen d'un film français est d'environ trois millions de francs, le budget de certaines grandes productions peut être dix fois plus élevé, tandis que celui des films sans grandes vedettes, sans publicité et tournés parfois avec des moyens précaires, tourne autour d'une centaine de milliers de francs. Il s'avère donc très difficile, même au sein du cinéma commercial, d'établir des règles générales concernant la production et la réalisation des films. De plus, leur distribution, qui se limitait autrefois aux salles de spectacle conventionnelles, est aussi, depuis quelques années, réalisée par l'intermédiaire de la télévision.

* *Films à caractère professionnel ne faisant pas l'objet d'une distribution classique*. Dans cette catégorie se trouvent les films d'actualités, de reportage et de documentaire, généralement réalisés en 16 mm avec du matériel léger apte à des prises de vues « sur le champ » dans des conditions difficiles. Leur distribution est assurée principalement par les différentes chaînes de télévision, les instituts nationaux et certains organismes d'enseignement. Ils peuvent aussi servir de support à la réalisation de cours audio-visuels : il n'est d'ailleurs pas rare, dans ce cas, que les copies projetées soient en format Super 8 mm.

Il faut y ajouter les films industriels et scientifiques. Les premiers étudient et mettent en valeur certains aspects de l'activité industrielle (jusqu'à se transformer dans certains cas en une véritable opération publicitaire). Les films industriels, malgré des conditions de tournage parfois très difficiles, sont réalisés à l'aide de matériel professionnel et suivant des méthodes classiques. Il n'en est pas de même des films scientifiques qui nécessitent fréquemment l'emploi de caméras à grande vitesse, d'objectifs spéciaux, de films « à infrarouges » et de projecteurs d'analyse. Cette énumération n'est évidemment pas limitative, puisqu'il existe, pourrait-on dire, un nombre illimité d'appareils spéciaux destinés au cinéma scientifique : nous ne citerons, à titre d'exemple, que les endoscopes utilisés pour la réalisation de certains films médicaux, qui permettent l'exploration des diverses cavités du corps humain.

Enfin, les films publicitaires appartiennent également à cette catégorie : le film sert alors de support à des slogans publicitaires. Bien que leur contenu soit parfois fort discutable, il convient de remarquer que ces films sont bien souvent d'une qualité technique exceptionnelle. Ils sont réalisés en format 35 mm ou 16 mm et font fréquemment appel à des truquages fort intéressants. Leur distribution est assurée, sous forme de « spots publicitaires », dans les salles de spectacle et à la télévision.

* *Films d'amateurs ne faisant l'objet d'aucune exploitation commerciale*. Le petit monde du cinéma d'amateur s'est considérablement agrandi depuis une dizaine d'années, en partie grâce aux nombreuses améliorations techniques (facilité d'emploi, encombrement réduit, meilleure qualité des optiques, etc.) qui ont été apportées aux appareils de format réduit ainsi qu'aux prix de vente relativement bas pratiqués par les différents constructeurs (le nombre des appareils vendus et la concurrence jouant dans ce sens). Le format Super 8 mm, qui a progressivement remplacé le 8 mm et le 9,5 mm, est incontestablement le format le plus souvent utilisé. Les films d'amateur ont en général un caractère familial ou documentaire, même si d'aucuns, à partir d'un scénario préalablement établi, font appel à des dialogues et à des bruitages synchrones.

## *Préparation d'un film*

A l'origine, un film n'est qu'une idée confuse dans l'esprit d'un créateur — à moins qu'il ne s'inspire d'un ouvrage littéraire ou d'une pièce de théâtre, idée qui fera ses premiers pas dans le monde du cinéma sous la forme d'un « synopsis » ; ce dernier, sorte de résumé, sera ensuite développé et structuré en unités dramatiques d'où sera tiré le scénario. Le scénariste — encore appelé adaptateur — établira alors, en collaboration avec le réalisateur et le dialoguiste, la continuité dialoguée qui servira de base à l'élaboration du découpage du film : les unités dramatiques seront découpées en séquences,

les scènes en plans, et chaque plan sera caractérisé par son cadrage, l'angle sous lequel il sera pris, la focale utilisée et, enfin, par le nombre plus ou moins important de renseignements techniques à l'usage des différents collaborateurs du metteur en scène.

Chaque réalisateur utilise une technique particulière de découpage et, si certains établissent des découpages extrêmement précis avec des plans au sol indiquant le déplacement des personnages et de la caméra, d'autres, au contraire, se contentent d'un minimum de préparation pour se donner au tournage une certaine liberté d'improvisation. Le découpage est avant la lettre une représentation écrite du film : chaque plan y est décrit par rapport à la partie de l'espace qu'il recouvre, d'où les appellations de plan général et de plan d'ensemble, et relativement à une échelle anthropométrique (plan moyen, plan américain, gros plan et très gros plan). A partir de là, le réalisateur détermine les angles de prise de vues en fonction de la hauteur à laquelle est placée la caméra : hauteur normale, plongée, contre-plongée. Le découpage doit également préciser si le plan est fixe ou s'il est affecté d'un mouvement de caméra : panoramique, travelling, travelling optique ou mouvement combiné. Enfin, l'auteur du découpage doit également prévoir la succession des plans en évitant les faux raccords de toutes sortes.

Une fois terminé, le découpage est remis à l'assistant réalisateur qui, en collaboration avec la « script-girl », en établit le dépouillement. Ce dernier, comme son nom l'indique, consiste à répertorier en détail tous les personnages, les accessoires et les décors ayant place dans le découpage. Chaque plan est dépouillé, minuté et classé chronologiquement par rapport à l'ordre de tournage du film. A partir du découpage et du dépouillement, on procède au choix des comédiens, des décors, des extérieurs et des accessoires, enfin de tous les moyens matériels nécessaires au tournage des différentes scènes. A la fin de cette période de préparation, dont la durée, très variable, peut s'étaler sur une année entière, le premier assistant-réalisateur établit le plan de travail, vaste tableau récapitulatif qui servira de guide pendant toute la durée du tournage.

## *Le film : du tournage à la projection*

De l'enregistrement des images sur la surface sensible jusqu'à leur restitution sur les écrans des salles de spectacle, le film parcourt un long itinéraire aux contours très précis. Nous allons étudier à l'aide d'un schéma les différentes étapes du parcours et faire ainsi une première approche de la terminologie propre au cinéma (*fig.* 1). **(1)**. Images et sons sont enregistrés en synchronisme sur leurs supports respectifs : le film et la bande magnétique lisse 6,25 mm. **(2)**. Les prises sélectionnées du film sont envoyées dans un laboratoire cinématographique afin d'y être développées et tirées. **(A)**. Pendant ce temps, la bande magnétique lisse est repiquée sur une bande magnétique perforée. **(3) (B)**. On effectue alors dans la salle de montage le prémontage synchrone de la copie de travail, de la « bande-image » et de la « bande-son ». Il est ensuite possible pour l'équipe de production de visionner les « rushes » synchrones des scènes précédemment tournées et de faire ainsi une sélection définitive des plans à conserver ou éventuellement à refilmer. Lorsque le tournage du film est achevé, on obtient alors le prémontage synchrone de la bande-image et de la bande-son. **(C)**. A cette dernière s'ajoutent également des éléments de mixage (bruitages, phases musicales). **(4)**. Il convient de remarquer que du négatif original sont tirés un interpositif de sécurité, utilisable en cas de perte ou de dégradation de l'original, et un autre interpositif, **(5)** monté soigneusement sur le modèle de la copie travail. Ce dernier passe ensuite dans une tireuse optique au service « truca » du laboratoire, dans lequel on effectue la réalisation des effets spéciaux (fondus, effets de volets, etc.) **(6)**. On obtient de la sorte un internégatif monté et truqué. **(7)**. Cette opération terminée, on procède en laboratoire au délicat montage du négatif original : c'est la conformation du négatif. Ce travail est effectué à l'aide de chiffres repères, dits « footage », inscrits, tous les pieds, sur le négatif, et photographiés sur le positif. **(E)**. D'un autre côté, les différentes bandes-son (paroles, bruitages, musique) sont mixées ensemble sur une même bande. **(8)**. Une copie zéro est alors tirée, sur laquelle on effectue le transfert optique du son. Elle permet à la production de contrôler la qualité finale du film ; si elle est jugée satisfaisante, on procède au tirage d'un ou de plusieurs interpositifs, **(9) (H)** sur lesquels est modulé le son optique, puis d'internégatifs dont le nombre dépend de l'ampleur de la diffusion envisagée et, en dernier lieu, au tirage des copies du pays d'origine. En effet, une bande sonore uniquement constituée de musique et de bruitage est mixée pour les pays étrangers. Le doublage dans la ou les langues choisies est réalisé dans une salle dite de « doublage » ; on obtient ensuite les copies destinées à l'étranger selon le même procédé que celles à destination du pays d'origine.

## *Les formats de films et les différents procédés cinématographiques*

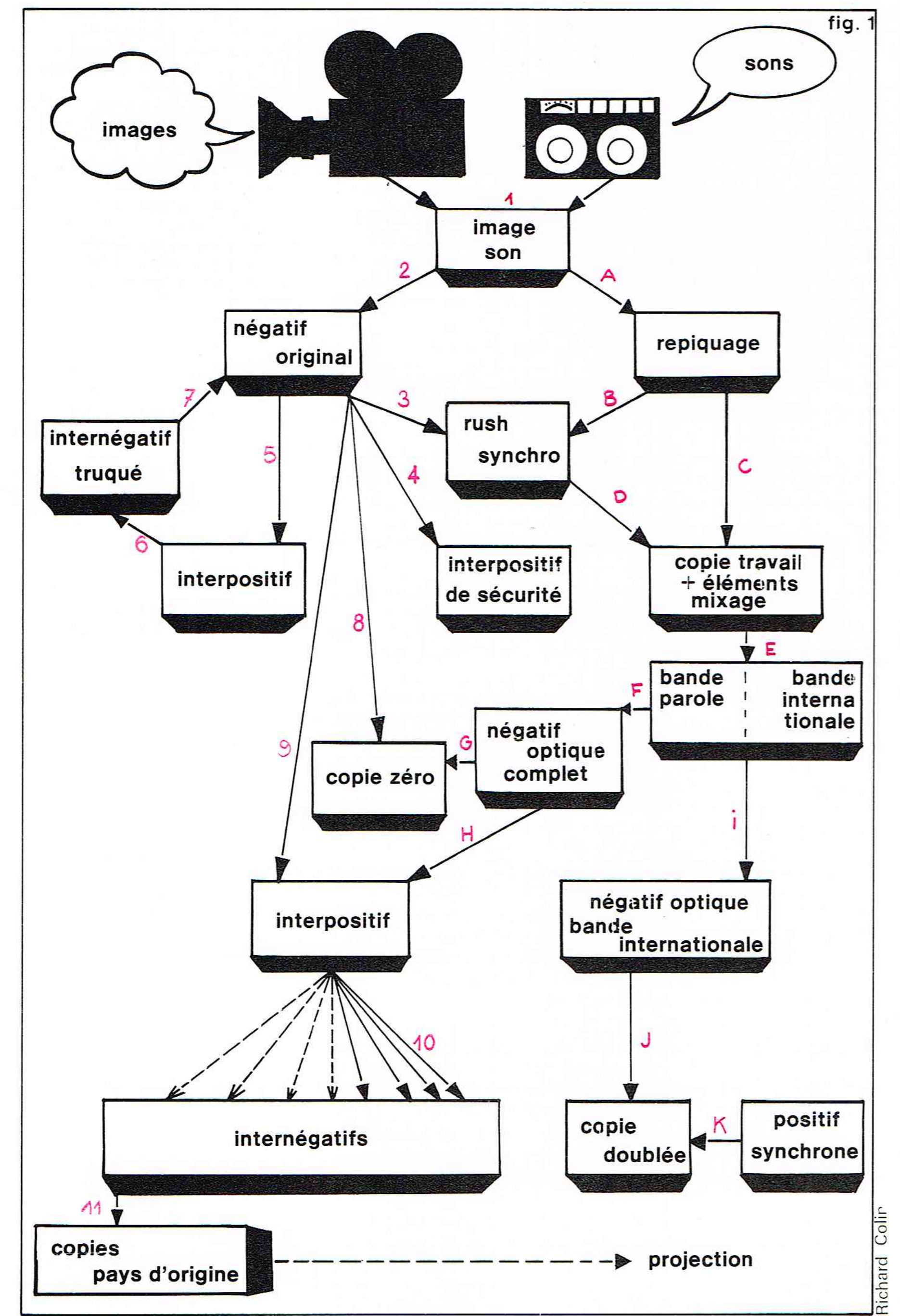
Le format du film correspond à la largeur de la pellicule. Le format de l'image est indépendant du format du film : il est caractérisé par le rapport entre la largeur de l'image et sa hauteur, $F_{image} = \frac{L}{H}$ ; par exemple, 1,33 (image du film standard muet 35 mm) $= \frac{24 \text{ mm}}{18 \text{ mm}}$. Depuis la naissance du cinéma jusqu'à la fin du cinéma muet, l'image cinématographique positive s'est présentée sous le format suivant : 18 mm pour la hauteur, et 24 mm pour la largeur ; proportion : 1,33. Les intervalles séparant les images avaient des cotes de 0,5 mm à 1 mm, selon l'appareil employé par l'éditeur de films. Les diverses cotes de la pellicule de cinéma, et surtout celles de la perforation, connurent un commencement de normalisation au Congrès international des éditeurs de films de 1908, présidé par Georges Méliès. Quand le cinéma sonore apparut, l'image fut réduite afin de laisser une marge pour l'enregistrement des sons, et l'image positive se présenta sous le format suivant : 18 mm pour la hauteur et 21 mm pour la largeur, soit une proportion de 1,16. Mais l'image inscrite dans ce format presque carré était disgracieuse, et cette proportion était contraire à tous les principes de composition selon lesquels un des éléments de la forme doit dominer l'autre. Devant cette exigence, et pour trouver une proportion meilleure, on augmenta les intervalles entre les images, et le format normalisé apparut : 16 mm × 22 mm, proche de la proportion 1,37 (16,5 mm × 22 mm).

Mais, déjà, on travaillait dans le format dit « cadre américain » qui se présentait, pour l'image projetée, sous la forme de 15,6 mm de hauteur et de 20,8 mm de largeur, soit une proportion de 1,33. On distingue de nos jours six grands types de format de films : le 70 mm et le 35 mm, réservés généralement à la production professionnelle, le 9,5 mm, le 8 mm et le « Super 8 mm », considérés comme formats d'amateurs, et le 16 mm employé à des fins diverses par chacune des catégories précédemment citées.




Y. Jeannougin-Viva

▼ ***Une scène du tournage du film* Section Spéciale *de Costa-Gavras, à Paris en 1974.***




## Le format 35 mm

C'est le format type employé par les professionnels. Le défilement du film dans la caméra est vertical, son entraînement est bilatéral et porte simultanément sur 2, 4 ou 8 perforations. Les dimensions de l'image du standard muet sont 24,4 mm × 18,4 mm, soit un format de 1,33, et un coefficient d'utilisation du film de 0,69. Les dimensions de l'image du standard sonore 35 mm sont 22 mm × 16 mm, soit un format de 1,37, et un coefficient d'utilisation de 0,55 (*fig.* 2). On dénombre 4 perforations par image et par côté.

La plupart du temps, un cache métallique est interposé devant la fenêtre de prise de vue, de façon à obtenir des formats panoramiques : la largeur de l'image reste inchangée, tandis que la hauteur diminue. On obtient ainsi le format de 1,65 (22 mm × 13,27 mm), format devenu classique sur film 35 mm. En interposant un cache sur la fenêtre de projection, on a la possibilité de créer les formats 1,75 (21 mm × 12 mm) et 1,85 (21 mm × 11,35 mm). Cette solution simple, permettant d'obtenir des formats panoramiques, présente néanmoins deux graves inconvénients : elle implique, d'une part, une perte de surface importante dans l'interimage (l'image muette standard a une surface utile de 432 $mm^2$ qui est réduite à 268 $mm^2$ pour le 35 mm sonore de format 1,65) et, d'autre part, l'apparition de fâcheuses surprises de cadrage lors de la projection (dues aux dimensions différentes de la fenêtre de prise de vue et de la fenêtre de projection). Le film 35 mm peut également être utilisé en défilement horizontal : c'est le procédé Vistavision de Paramount qui nécessite, soit l'utilisation d'un projecteur à défilement horizontal, soit le tirage de copies panoramiques.

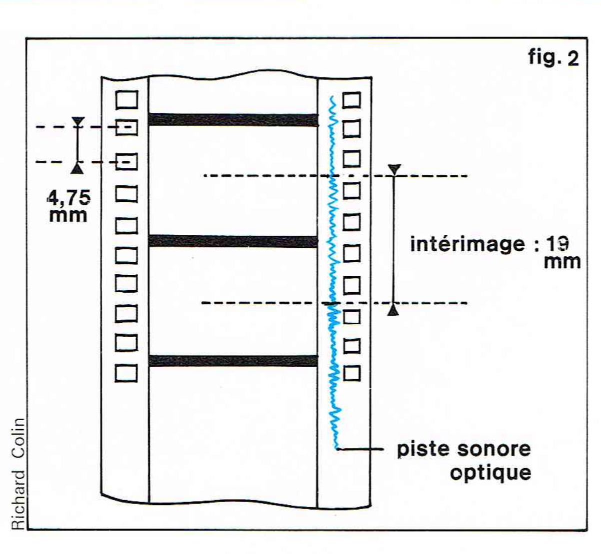
## Le format 70 mm

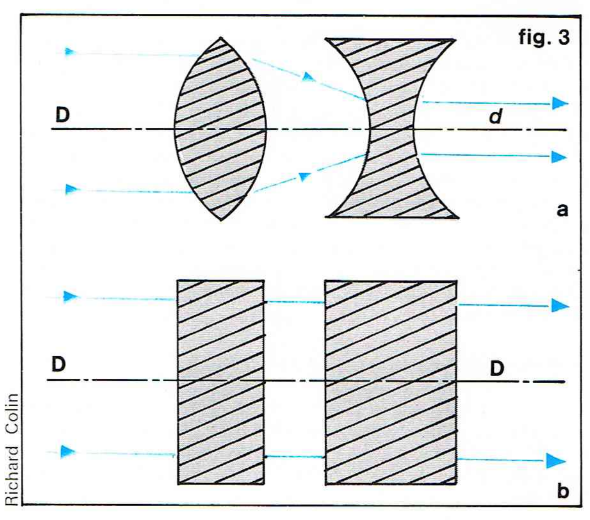
Les films positifs 70 mm sont tirés à partir de négatifs de 65 mm de format. Durant le tirage, il n'y a pas d'augmentation de la surface de l'image : il est simplement rajouté l'espace nécessaire à l'emplacement des différentes pistes sonores. Le film de 65 mm de large contient une image de 49 mm sur 22 mm (soit un format panoramique de 2,2), comportant 5 perforations par côté.

## L'anamorphose et son application directe : le cinémascope

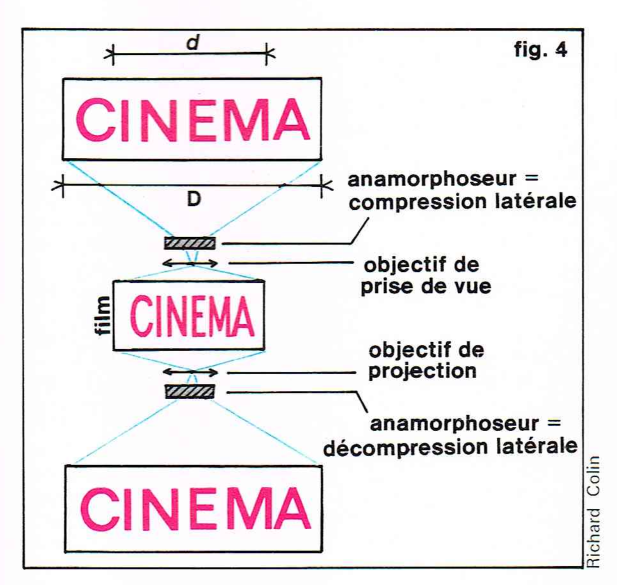
L'anamorphose est un procédé optique qui permet de réduire ou au contraire d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif. En cinéma, les anamorphoses s'effectuent uniquement sur la largeur de l'image (*fig.* 3) : de ce fait, la hauteur restant inchangée, l'image du sujet se trouve compressée en largeur sur le négatif comme sur le positif, puis décompressée lors de la projection à l'aide d'un objectif anamorphoseur (*fig.* 4). Il va de soi que la décompression réalisée durant la projection doit être proportionnelle à la compression qui a eu lieu lors de la prise de vue, faute de quoi les images restituées présenteraient des déformations anormales. La première utilisation d'un anamorphoseur en cinématographie remonte à 1928, date à laquelle le professeur Chrétien mit au point son dispositif optique « hypergonar ».

*▲ Figure 1 : les différentes étapes de la réalisation d'un film, depuis le tournage jusqu'à la projection.*




*► Figure 2 : les caractéristiques du film standard sonore 35 mm.*
*Figure 3 : principe de l'anamorphose, procédé qui permet de réduire ou d'agrandir l'image d'un objet donnée par un objectif ;* **a**, *la réduction de l'image est réalisée dans le plan horizontal ;* **b**, *l'image reste inchangée dans le plan vertical.*




◀ *Figure 4 :* ***principe du cinémascope; l'image du sujet est compressée en largeur sur le négatif par l'anamorphoseur, puis décompressée lors de la projection par un objectif anamorphoseur.*** ***d : champ couvert par l'objectif.*** ***D : champ couvert par l'objectif muni d'un anamorphoseur.***

L'hypergonar, qui était alors disposé à l'avant d'un objectif sphérique classique, se présentait sous la forme d'un système optique afocal constitué de deux lentilles cylindriques (convergente et divergente). Ce n'est qu'en 1953, après qu'il eut subi quelques modifications, que la Société Fox commercialisa ce procédé sous le nom de *cinémascope*.

Dans les systèmes « en scope » généralement utilisés de nos jours, le coefficient d'anamorphose est de 2 : on filme donc des champs deux fois plus larges qui, après avoir été compressés sur le film, sont restitués sur l'écran à leurs dimensions réelles. Le cinémascope, qui utilise une pellicule 35 mm à petites perforations carrées, a un format de 2,55 (image négative compressée : 18,7 mm × 24 mm) qui se réduit à 2,35 lors de la projection. Il existe également de nombreux procédés spéciaux mettant en œuvre un anamorphoseur à la prise de vue ou en laboratoire. Parmi les plus usités en 35 mm, on peut citer le Techniscope, le Technirama, le Panavision et le Vistavision de Paramount, et, en 70 mm, le Super Panorama, le Panavision et l'Ultra Panavision. Il convient de préciser que les anamorphoseurs utilisés pour le tirage optique en laboratoire sont généralement constitués d'un système prismatique qui opère pour des distances conjuguées invariables.

### Le format 16 mm

Né en quelque sorte de l'avènement de la télévision, le format 16 mm offre de très nombreuses possibilités d'utilisation. Il demeure en effet le seul type de film qui permette d'utiliser dès la prise de vue une émulsion négative ou une émulsion inversible (développée par inversion et tirée sur contretype inversible). Il en résulte que les copies 16 mm peuvent être réalisées à partir du tirage contact d'un film négatif 16 mm, par inversion à partir d'un original inversible ou par réduction optique d'un film négatif 35 mm. Dans sa version muette, le film 16 mm dispose de deux rangées de perforations, d'une seule rangée dans sa version sonore afin de permettre l'enregistrement photographique des sons. L'image standard est définie aux dimensions 7,42 mm × 10,22 mm, soit un format de 1,35 et un coefficient d'utilisation de 0,58. Un procédé, relativement récent, connu sous le nom de Super 16, consiste à faire défiler dans une caméra spécialement adaptée un film 16 mm à une seule rangée de perforations que l'on impressionne sur une plus grande largeur. Le film original obtenu, uniquement destiné au tirage (« gonflage ») de copies 35 mm, offre un format d'image de 1,85 (7,42 mm × 12,38 mm), et son coefficient d'utilisation s'élève à 0,77.

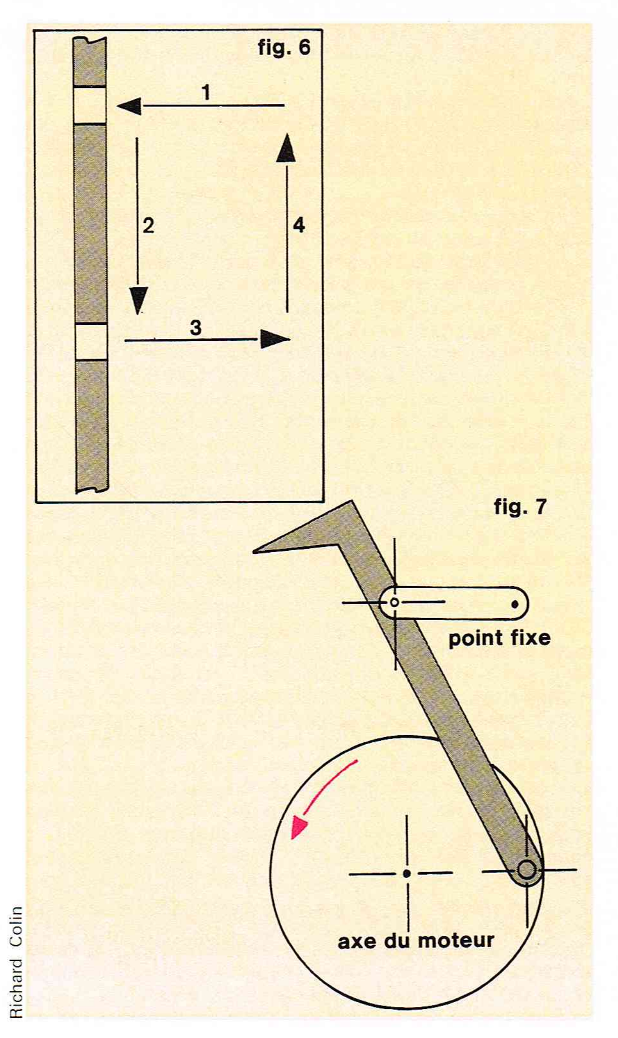
### Les formats 8 mm et Super 8 mm

Ils utilisent exclusivement des pellicules inversibles noir et blanc ou couleurs. Les copies peuvent être réalisées par inversion à partir d'un original inversible 8 mm ou Super 8 mm, ou par réduction optique d'un dispositif intermédiaire 16 mm ou 35 mm; dans ce dernier cas, les images sont quadruplées sur un film 32 mm, disposant de quatre rangées de perforations, que l'on recoupe après développement. Le film 8 mm classique dispose d'une rangée de perforations rectangulaires horizontales, et son image, de format 1,33, est aux dimensions 4,37 mm × 3,28 mm (surface d'image : 14,33 mm²); l'éventuelle piste de son magnétique est positionnée entre les perforations et le bord de la pellicule. Le film Super 8 mm, dont les perforations rectangulaires sont verticales et de plus petites dimensions, a une image de 5,36 mm × 4,01 mm (surface d'image : 21,49 mm², format : 1,33), et sa piste de son magnétique est couchée du côté opposé aux perforations. Signalons également **le format 9,5 mm** qui utilise une rangée centrale de perforations (disposées alors au milieu des interimages) : son image est aux dimensions 8,5 mm × 6,5 mm (format : 1,32, surface : 55,25 mm²).

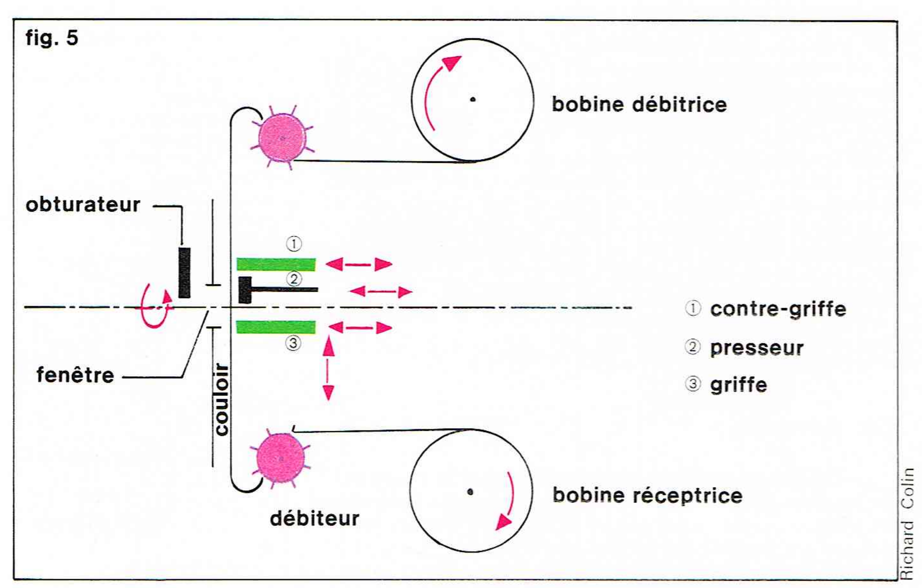
## *La caméra*

La caméra est une chambre noire à laquelle s'ajoutent un système optique de transmission des rayons lumineux qui proviennent du sujet et un mécanisme d'entraînement intermittent du film. Ce dernier est directement fondé sur le phénomène de la persistance rétinienne suivant lequel l'œil assimile une suite de stimuli très rapprochés (inférieurs à 0,1 s) à une vision continue. Pour que l'œil puisse reconstituer les différents mouvements à la projection, il est nécessaire d'utiliser une fréquence de prise de vues au moins égale à 16 images par seconde.

Le mécanisme de la caméra est illustré par le schéma de la *figure* 5 : le film monté sur la bobine débitrice est conduit à l'aide d'un tambour denté (débiteur) vers le couloir de la caméra; il passe devant la fenêtre de prise de vue, puis est repris par un autre débiteur avant d'achever sa course sur la bobine réceptrice. Deux griffes (3) entraînent la pellicule à raison de 24 déplacements par seconde, en la faisant descendre d'une distance égale




◀ ***Figure 6 : principe de l'escamotage d'une image lors de l'entraînement du film dans une caméra (voir développement dans le texte).*** ***Figure 7 : dispositif d'entraînement du film dans une caméra d'amateurs.***




▲ *Figure 5 : mécanisme classique d'une caméra; 1, contre-griffe; 2, presseur; 3, griffe.*

à la hauteur d'une image; lorsque le mouvement de descente est achevé, deux contre-griffes (1) s'engagent dans les perforations et immobilisent le film; cette action des contre-griffes est accompagnée d'un mouvement identique du presseur dorsal (2) qui applique fortement la pellicule contre le couloir d'impression : le film étant immobilisé, l'obturateur se dégage, permettant ainsi à la surface sensible d'être impressionnée. Ces différents organes agissent en parfait synchronisme : c'est un moteur unique qui régit leurs différents mouvements.

## *Principe d'entraînement du film*

Le mécanisme chargé d'assurer le remplacement d'une image par la suivante comporte quatre temps distincts (*fig.* 6) :

1 : engagement des griffes dans les perforations par un mouvement horizontal d'arrière en avant;

2 : les griffes entraînent la pellicule de haut en bas d'une distance égale à la hauteur d'une image (19 mm pour le film 35);

3 : les griffes se dégagent des perforations par un mouvement d'avant en arrière;

4 : les griffes, dégagées des perforations, remontent d'une image et se présentent dans leur position initiale.

Les systèmes d'entraînement sont en général à cames ou à excentrique; dans le cas des caméras d'amateurs, ils offrent même l'apparence d'une certaine simplicité (*fig.* 7). Les griffes agissent en synchronisme avec les contre-griffes, le presseur dorsal et l'obturateur : l'engagement des griffes correspond au retrait des contre-griffes et au début de la fermeture de l'obturateur; lors de leur abaissement, et donc du déplacement du film, les contre-griffes sont totalement retirées et l'obturateur fermé; les contre-griffes pénètrent dans les perforations lorsque les griffes se retirent, l'obturateur demeurant fermé; il se dégage lorsque les contre-griffes sont parfaitement engagées et que les griffes effectuent leur remontée. Pour une cadence de prise de vues normale, le cycle d'escamotage d'une image s'effectue en 1/24 s : l'immobilisation de l'image dure 2/3 du temps total, soit 1/36 s. Il est donc possible d'impressionner la surface sensible durant toute cette période, l'obturateur, dans ce cas, devant être ouvert à 240°. Cette solution présentait un avantage incontestable à une époque où les émulsions cinématographiques avaient une sensibilité limitée. De nos jours, en vue d'obtenir une décomposition meilleure du mouvement, le temps de pose a été sensiblement réduit : on limite l'ouverture de l'obturateur à 180°, le temps d'exposition du film étant alors ramené à 1/48 s.

## *Organes et accessoires complémentaires*

L'adjonction d'un certain nombre d'organes annexes est nécessaire pour faciliter la prise de vue et améliorer le rendu final des images. Certains d'entre eux sont indispensables au fonctionnement normal de l'appareil : couloir d'impression, presseurs, obturateur, moteur, magasins et chargeurs et, enfin, système de visée. D'autres peuvent être considérés comme accessoires, puisqu'ils ne conditionnent pas directement le fonctionnement de la caméra : parmi les plus importants, citons les supports, les para-soleil et les porte-filtres. Ce sont généralement ces organes et ces accessoires complémentaires qui permettent de différencier les différents types d'appareils de prise de vues.

**Le couloir d'impression** est une pièce métallique traversée en son centre par une fenêtre dont les dimensions correspondent à celles de l'image. Le couloir possède des évidements latéraux pour le passage des griffes et des perforations dans lesquelles les contre-griffes viennent se stabiliser. Le maintien latéral du film est assuré par le bord mobile du couloir qui est monté sur des ressorts tarés. La fenêtre d'impression doit également être munie d'une glissière permettant le passage de caches pour l'obtention de formats panoramiques. Dans les caméras d'amateurs, le couloir n'est composé que d'une pièce métallique rigide et d'une fenêtre d'impression.

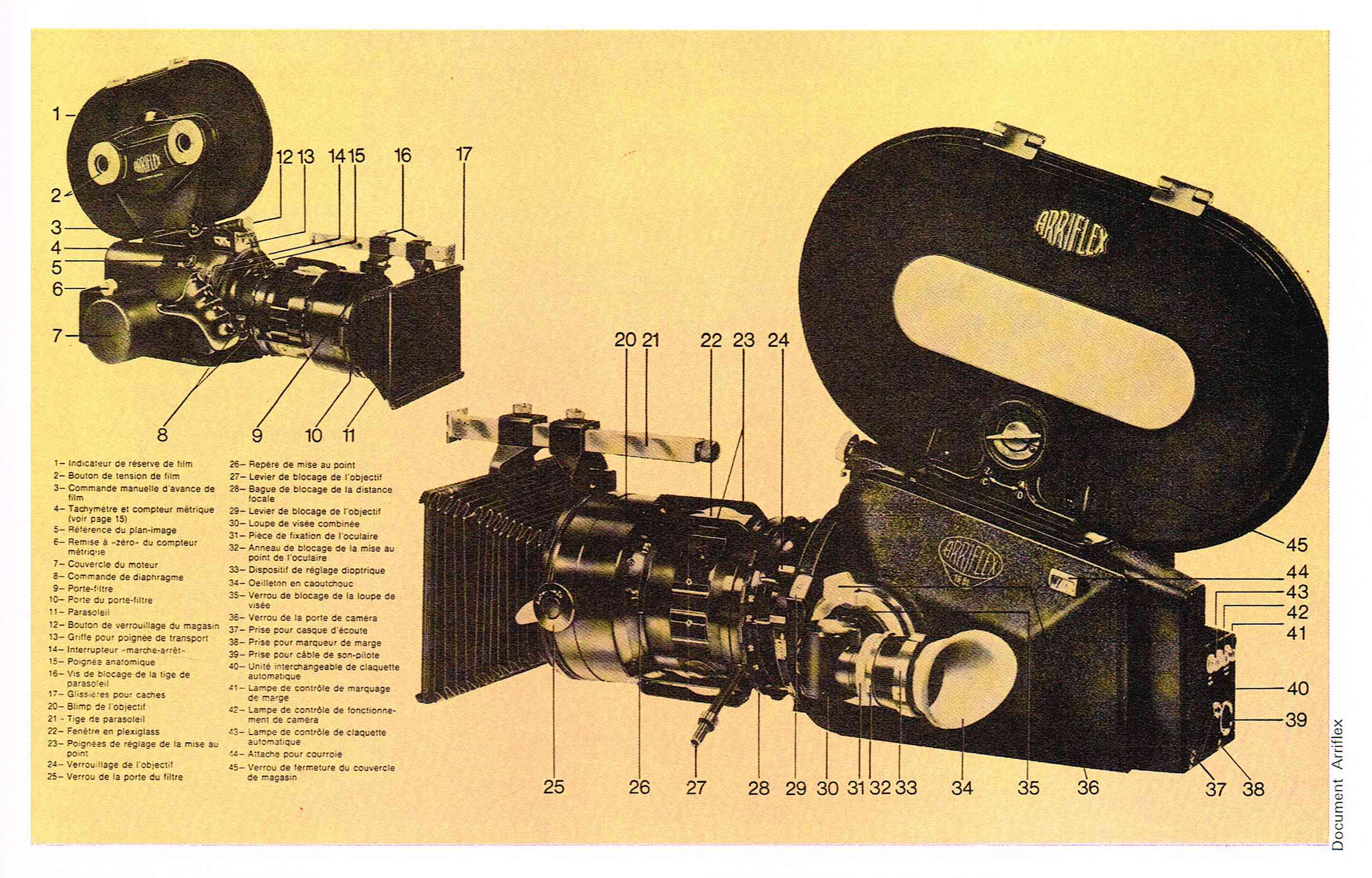
**Les presseurs** maintiennent latéralement le film et l'appliquent contre la fenêtre d'impression lors de son immobilisation. Les presseurs latéraux font partie intégrante du couloir d'impression tandis que le presseur dorsal peut être indépendant et actionné à l'aide d'une came ou lié directement au chargeur lui-même. Dans ce dernier cas, son action constante est régulée à l'aide d'un ressort taré : cette solution est adoptée sur l'ensemble des caméras *Super 8* ainsi que sur la caméra professionnelle *Cameflex* 16/35 mm.

La fonction de **l'obturateur** consiste à intercepter le faisceau lumineux provenant de l'objectif lors du déplacement du film et à assurer son libre passage pendant l'immobilisation du mécanisme d'entraînement. L'obturateur est dit fixe si son angle d'ouverture ne peut être changé : c'est le cas de certaines caméras *Super 8* non perfectionnées dont l'obturateur se présente sous la forme d'un disque évidé de 160° d'ouverture. Il est dit variable si l'on rapporte à ce disque une pale mobile chargée de faire varier l'angle d'obturation : la pale fixe est généralement ouverte à 180°, et la pale mobile peut fermer totalement l'obturateur. Cette variation est possible sur certaines caméras d'amateurs durant la prise de vues elle-même, et permet ainsi la réalisation de fondus « au noir » et de fondus enchaînés. Le temps d'exposition du film varie évidemment en fonction de l'ouverture de l'obturateur : si l'on désigne par $\alpha$ son angle d'ouverture et par $v$ sa vitesse angulaire, le temps d'exposition est donné par la formule $T = \frac{\alpha}{v}$, qui donne la valeur de l'ouverture photométrique de l'objectif quelle que soit l'ouverture de l'obturateur.

Certaines caméras professionnelles *(Arriflex)* sont dotées d'obturateurs à deux pales symétriques — auxquelles s'ajoutent généralement deux pales mobiles — qui offrent un équilibrage dynamique de meilleure qualité. Afin de conserver le même temps d'obturation, la rotation de leur axe doit s'effectuer deux fois moins vite, et l'ouverture angulaire de chaque pale doit être réduite de moitié. Enfin, il existe sur un petit nombre de caméras *Super 8 (Beaulieu)* des obturateurs à guillotine animés d'un mouvement alternatif de va-et-vient.

**Les magasins** et **les chargeurs** contiennent le film avant et après exposition. Les magasins peuvent être indépendants; ils sont alors utilisés indistinctement comme récepteurs ou comme débiteurs, ou monoblocs, et dans ce cas, simples ou à « mécanismes ». Ces derniers sont généralement composés de deux débiteurs et d'un presseur dorsal, les boucles nécessaires à la traction discontinue du film étant alors effectuées à l'intérieur même du magasin (caméras *Super* 8, *Éclair* 16, *Cameflex* 16/35, etc.).

**Le moteur** entraîne toutes les parties mécaniques de la caméra. De la manivelle utilisée par les pionniers du cinéma muet jusqu'aux différents systèmes de régulation par quartz employés de nos jours, une infinie variété de moteurs a été élaborée. La plupart des caméras profes-




▲ ***Les parties constitutives d'une caméra.***

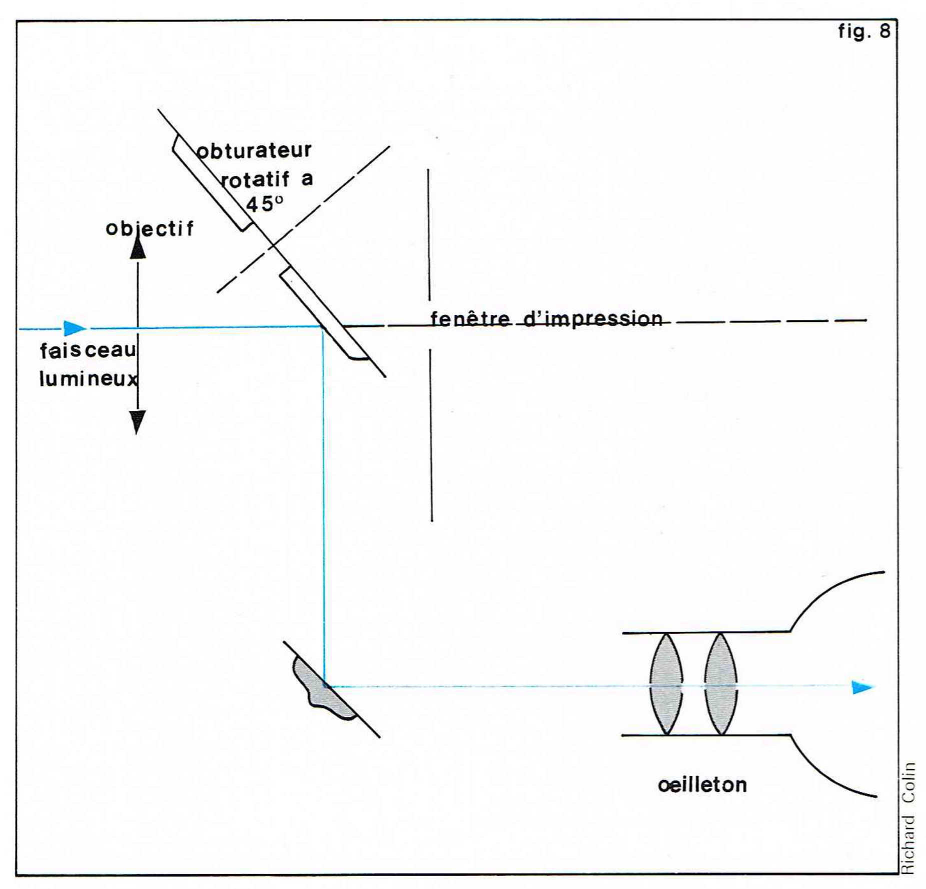
sionnelles de studio sont équipées de moteurs synchrones triphasés 220 volts ou de moteurs asynchrones-synchronisés 110 volts. Chaque fois que les sources d'alimentation du secteur ne sont pas utilisables (tournage en extérieur par exemple), on fait appel en principe à des moteurs à courant continu. Ceux-ci sont alimentés par des batteries de différents voltages, et leur vitesse se contrôle de deux manières différentes : le mode de contrôle le plus ancien est celui effectué à l'aide d'un rhéostat. Cette solution, qui, dans le cadre de prises de vues normales, est peu à peu délaissée, offre des avantages incontestables pour l'obtention d'effets spéciaux ou le tournage de films scientifiques qui nécessitent des cadences de prise de vues inférieures ou supérieures à la vitesse standard. Le second mode de contrôle consiste à régulariser électroniquement la vitesse par transistors : la mise en route du moteur est alors instantanée, et sa rotation a lieu à vitesse constante. Cette solution assure également un synchronisme rigoureux entre la caméra et le magnétophone, soit par une liaison électrique, soit directement par asservissement des appareils à l'aide d'oscillateurs à cristaux de quartz ou à diapasons.

**Le système de visée** donne au cameraman le contrôle, pendant la prise de vues, des qualités esthétiques et techniques des images qui se formeront sur la surface sensible. A l'origine, la visée était directement effectuée au travers du film à l'aide d'un dispositif constitué d'un système redresseur qui renvoyait l'image sur un oculaire. Cette solution, qui offrait alors peu de luminosité, fut totalement abandonnée lors de l'apparition des films en couleurs. On eut alors recours à la visée sur verre dépoli avec escamotage du couloir d'impression. Ce dispositif, équipé d'un viseur semblable à celui utilisé pour la visée au travers du film, permettait de vérifier le cadrage de l'image avant et après la prise de vue, mais laissait l'opérateur sans possibilité de contrôle pendant le tournage des scènes. Cette technique restait donc très limitée et interdisait, par exemple, de réaliser convenablement des mouvements de caméra.

Une autre solution, qui a été et reste encore très usitée, est celle offerte par le viseur externe qui se présente sous la forme d'une lunette de visée placée le long de la caméra. On se heurte alors à un problème d'un ordre tout différent, qui est celui de la parallaxe d'espace : le viseur externe ne présente pas, en effet, un champ semblable à celui embrassé par l'objectif. Ce procédé, dans sa version simple, resta toutefois utilisé sur certaines caméras de vulgarisation. Une version plus élaborée, créée et utilisée par la firme anglo-saxonne Mitchell, consiste à munir le viseur externe d'un système compensateur de parallaxe : la lunette de visée est reliée mécaniquement à l'objectif, et sa direction se trouve modifiée lors des changements de mise au point.

Les différents systèmes de visée que nous venons de passer en revue n'apportent pas de solution entièrement satisfaisante à l'ensemble du problème, et seule la visée reflex intégrale permet au cameraman de voir exactement l'image qui se formera sur la pellicule. Son principe consiste à prélever, entre l'objectif et la fenêtre d'impression, une partie des rayons lumineux provenant du sujet pendant la fermeture de l'obturateur (*fig.* 8). Ce dernier, qui fait un angle de 45° avec l'axe optique, est en partie recouvert d'un élément réfléchissant qui renvoie le faisceau lumineux provenant de l'objectif vers le haut de la caméra; le faisceau est alors orienté, à l'aide d'un miroir ou d'un prisme à réflexion totale, vers une lunette de visée munie d'un oculaire. On constate dans ce cas que l'image du sujet n'est transmise que pendant les périodes d'obturation : la visée reflex est donc intermittente, mais l'opérateur, de même que le spectateur dans la salle de projection, a une sensation de mouvement continu. Les caméras utilisant des obturateurs à guillotine peuvent également bénéficier de la visée reflex : il suffit pour cela de disposer un miroir à 45° sur la partie inférieure de l'obturateur.

Deux autres types de visée reflex, indépendants de l'obturateur (*fig.* 9), ont été adoptés par certains constructeurs (Paillard-Bolex, Pathé-Webo). Le premier d'entre eux consiste en un prélèvement partiel du faisceau lumi-




▲ *Figure 8 : dispositif de visée reflex sur obturateur.*

▼ *Figure 9 : dispositif de visée reflex indépendante de l'obturateur ; une partie du faisceau lumineux est réfléchie sur une microsurface ou sur une lamelle semi-réfléchissante.*

neux à l'intérieur même de l'objectif. Pour ce faire, deux prismes accolés, munis d'une microsurface commune réfléchissante, sont introduits entre les deux blocs de lentilles de l'objectif, et un système optique redresseur renvoie l'image vers un oculaire situé le long de la caméra. Il convient de noter que, dans ce cas, c'est l'objectif lui-même qui est reflex. Cette solution est particulièrement intéressante : par la simple adjonction d'un tel objectif, on rend reflex une caméra qui à l'origine ne l'était pas. Quant au second dispositif de visée reflex, il revient à introduire deux prismes accolés ou une lamelle semi-réfléchissante entre la partie postérieure de l'objectif et l'obturateur. Ces deux modes de visée combinent, sans scintillement, la clarté de l'image aérienne avec la précision du dépoli central, mais impliquent un prélèvement non négligeable sur le faisceau lumineux incident.

Un nouveau système de visée, directement lié à l'évolution des techniques électroniques, a récemment été mis au point sur un certain nombre de caméras professionnelles (*Camé 300, Mitchell Mark II*, etc.). Le viseur électronique laisse une entière liberté à l'opérateur durant le tournage de plans relativement complexes et permet la distribution de l'image sur plusieurs écrans de contrôle destinés aux autres membres de la production. Malgré la grande luminosité et les dimensions importantes de son image, il ne saurait remplacer le viseur reflex de manière définitive. Les solutions les plus élaborées sont à l'heure actuelle celles qui, sur un même appareil de prise de vues, autorisent l'utilisation simultanée de la visée électronique et de la visée reflex traditionnelle.

On distingue de ce fait trois types distincts de visée électronique :

— le système dit « Vidiflex », utilisé par Éclair, périme la visée reflex traditionnelle : l'élément réfléchissant de l'obturateur renvoie le faisceau lumineux dans un objectif de transport qui focalise l'image sur la mosaïque d'un tube analyseur ; celui-ci réalise le balayage d'un écran cathodique placé à la vue du cadreur.

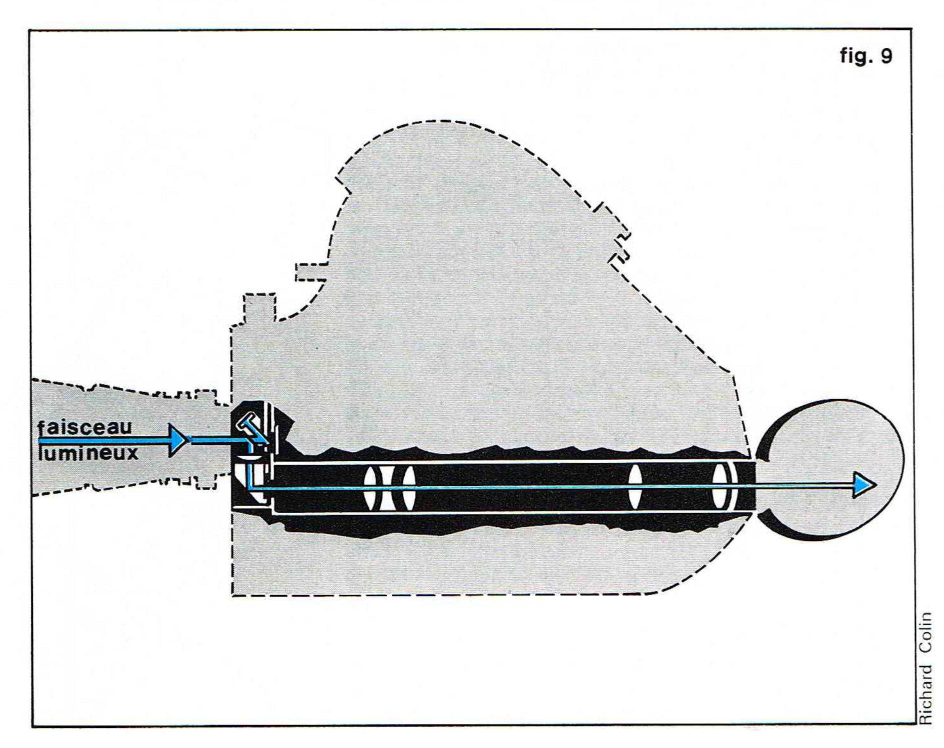
— le système dit « ADD. A. Vision », utilisé par certains fabricants anglo-saxons, est particulièrement adapté aux caméras munies d'un viseur externe à correction de parallaxe. Le viseur est dans ce cas totalement abandonné, et l'on utilise un objectif reflex (généralement un zoom) à prismes incorporés qui prélève une partie du rayon lumineux et la renvoie vers un écran cathodique. Les caméras utilisant le système ADD. A. Vision offrent également la possibilité d'effectuer avant la prise de vues un contrôle de l'image sur dépoli par escamotage du couloir d'impression.

— le système « DICOP », enfin, qui autorise indifféremment le contrôle de l'image par visée électronique ou par visée reflex. Le faisceau lumineux renvoyé par la pale de l'obturateur peut être dirigé soit vers la mosaïque d'un tube analyseur à l'aide d'un miroir à 45°, soit, par simple escamotage de ce dernier, vers une loupe de visée se terminant par un oculaire.

Tels sont les organes indispensables au fonctionnement normal d'une caméra. Si l'on effectue une prise de vues synchrone (enregistrement simultané du son), il faut alors y ajouter le système d'insonorisation : il est en effet impossible de réaliser une prise de son correcte aux côtés d'une caméra non insonorisée. Pour ce faire, l'appareil dans son entier est enfermé dans un caisson insonorisé appelé « blimp » : mais ce dispositif aboutit à des ensembles extrêmement volumineux et pesants qui manquent de souplesse et de maniabilité. Une autre solution consiste à n'insonoriser que les parties bruyantes de la caméra et à laisser l'objectif et les magasins à l'extérieur du caisson : les ensembles obtenus sont plus légers et n'impliquent pas, contrairement à la disposition précédente, l'introduction d'une glace double devant l'objectif. Enfin, depuis quelques années, certains constructeurs ont effectué une mise au point très précise des différents éléments du mécanisme d'entraînement, qui évite la répercussion des bruits au sein de l'appareil. Ce mode de construction particulièrement soigné caractérise les caméras autosilencieuses du type *Éclair 16*.

Le format du film et la constitution particulière des organes annexes déterminent en grande partie les critères d'utilisation des appareils. Aux formats réduits correspondent des caméras compactes, de faible poids, d'utilisation facile et surtout dont les prix modérés répondent aux possibilités et aux besoins des amateurs. Les appareils professionnels sont au contraire beaucoup plus complexes et onéreux, et leur utilisation met en œuvre des moyens parfois considérables.

A mi-chemin entre ces deux types d'appareils, le format 16 mm a su se créer une place bien particulière. Jadis exclusivement réservé aux amateurs fortunés, il a depuis quelques années des applications professionnelles nombreuses : télévision, reportage, documentaire, cinéma industriel et scientifique, etc.





de Andrade - Magnum

◀ *De la petite caméra automatique pour format 8 mm à la caméra professionnelle standard 35 mm, les possibilités sont nombreuses et permettent une bonne adaptation au type de film à réaliser : amateur, documentaire, reportage ou réalisation d'un long métrage.*

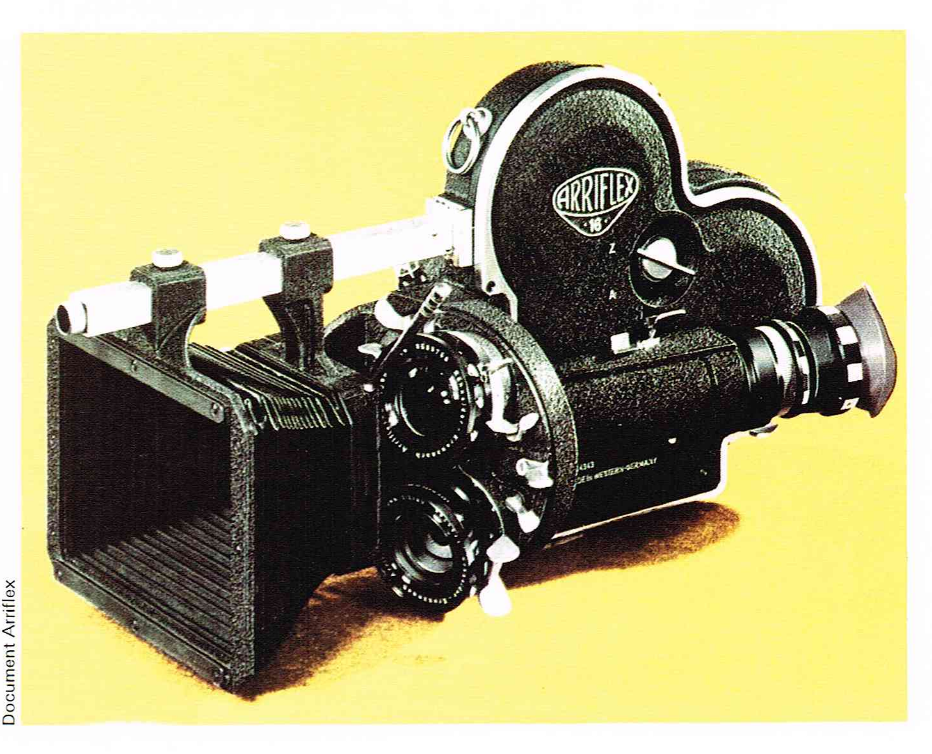
## Les différents types d'appareils de prise de vues

**Les caméras de formats réduits 8 mm, Super 8 et 9,5 mm** sont actuellement très nombreuses, et une description détaillée de leurs différentes caractéristiques ferait à elle seule l'objet d'une longue et minutieuse investigation. Depuis 1965, date de leur apparition sur le marché, les caméras Super 8 ont connu un essor considérable et ont supplanté en grande partie les anciens appareils 8 mm et 9,5 mm. Leur classification s'établit généralement suivant leur degré de perfectionnement. Les appareils les plus simples, destinés aux amateurs débutants, sont d'un emploi facile (objectif fixe réglé sur l'hyperfocale et viseur externe) et donnent des résultats satisfaisants dans la limite de leurs possibilités. On trouve également des appareils automatiques plus complexes munis, dans certains cas, d'un système de réenroulement partiel du film qui autorise la réalisation de surimpressions et de fondus enchaînés. Presque tous sont équipés d'objectifs zooms dont la variation de focale peut être commandée électriquement, de viseurs reflex et de posemètres incorporés; ils disposent bien souvent d'une large plage de mise au point et d'une vaste sélection de cadences de prise de vues. Enfin, il existe de nos jours un certain nombre de caméras (*Bell et Howell*, *Chinon*, *Beaulieu*, etc.) dotées d'un dispositif de pilotage qui permet un enregistrement synchrone du son.

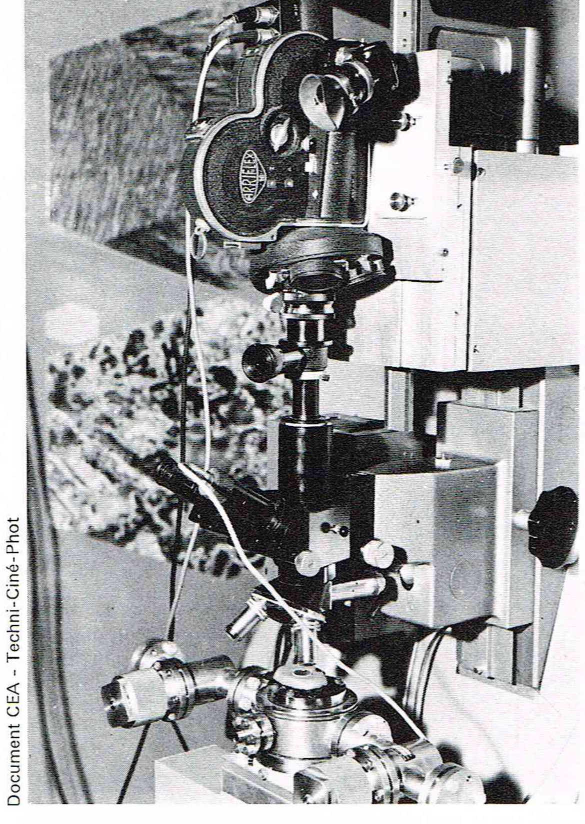
**Les caméras de format 16 mm** se classent d'ordinaire suivant leur utilisation : c'est ainsi que l'on distingue les caméras amateurs et semi-professionnelles *(Paillard-Bolex, Reflex 16 mm, Beaulieu R 16, Pathé-Webo BTL...)*, des caméras professionnelles, telles l'*Arriflex BL*, l'*Éclair ACL* et la *Mitchell 16*. Leur encombrement réduit et leur poids limité (excédant rarement 10 kg) les disposent particulièrement bien à la prise de vues d'actualités et de documentaires. Elles sont en général équipées de moteurs autorégulés alimentés par des batteries d'accumulateurs de 8, 10 ou 12 volts qui fournissent du courant continu à la cellule incorporée et à la claquette automatique. Les objectifs utilisés sont le plus souvent des zooms, mais certaines caméras disposent d'une tourelle orientable qui admet plusieurs objectifs de différentes focales et qui, une fois verrouillée, assure un tirage optique constant.

Toute caméra professionnelle, associée à un magnétophone approprié, permet des prises de vues en son synchrone double bande faites suivant le procédé de son pilote classique ou à l'aide de la commande quartz du moteur (sans liaison entre les deux appareils d'enregistrement). Récemment, on a pu mettre au point, sur certaines caméras destinées au tournage de films d'actualités, un dispositif d'enregistrement direct du son (« single-system ») composé d'une platine d'enregistrement et d'un amplificateur transistorisé.

▼ *Une caméra professionnelle de format 16 mm* **(Arriflex 16 ST)** *; l'encombrement réduit et le poids limité des caméras 16 mm les font utiliser pour les prises de vues d'actualités et de documentaires.*




Document Arriflex



Document CEA - Techni-Ciné-Phot

▶ *Une caméra 16 mm équipée d'un dispositif vue par vue et montée sur un microscope ; cet ensemble permet l'observation de cultures de tissus, l'étude de l'action des médicaments, etc.*

**Les caméras professionnelles standard 35 mm** sont des appareils très onéreux et très encombrants qui doivent être en mesure, grâce à leur construction et leur finition soignées, d'assurer des prises de vues de grande qualité. Elles sont généralement équipées de deux contre-griffes, d'un système de visée reflex ou électronique, d'objectifs interchangeables et d'un tachymètre de grande précision ; dans la plupart des cas, elles peuvent recevoir des magasins de 120 et 300 m. Les appareils occidentaux les plus utilisés en studio sont le *Camé 300* reflex, le *Mitchell BNC*, le *Reflex MARK II*, et le *Super Parvo* de Debrie.

Comme ces caméras sont fort volumineuses, on leur préfère, pour des prises de vues en extérieur ou en intérieur naturel, des appareils plus légers et plus maniables tels le *Cameflex* 16/35 ou l'*Arriflex 35 BL*. Le *Cameflex*, fabriqué par la société française Éclair, a la particularité de pouvoir utiliser, par simple modification du déplacement des griffes et de la fenêtre d'impression, des films de formats 35 mm et 16 mm : c'est un appareil très léger, disposant d'une tourelle divergente à trois emplacements et d'un moteur peu volumineux, qui, fixé sur le côté de l'appareil, peut servir de poignée. L'*Arriflex 35 BL* est une caméra autosilencieuse de fabrication récente qui bénéficie des toutes dernières techniques, en particulier d'un dispositif de pilotage de synchronisation du son par circuit à quartz (disposé sur le moteur) : son équilibrage dynamique est particulièrement bien adapté à des prises de vues en « caméra portée ».

▼ *Le fusil photographique réalisé en 1882 par E.J. Marey (1830-1904) ; cet appareil permettait l'enregistrement d'une série de 12 images par seconde sur une plaque circulaire. Il était utilisé pour l'étude du mouvement (vol d'oiseaux par exemple).*



Archivio Turconi

**Caméras spéciales** pour la réalisation de films scientifiques. La particularité de ces caméras tient à leur mécanisme d'entraînement du film. Les caméras grande vitesse autorisent des prises de vues à des cadences très élevées, c'est pourquoi on les utilise en balistique et en aérodynamique pour la décomposition de mouvements. Le principe de défilement du film par entraînement intermittent — qui n'autorise guère de cadences supérieures à 300 images par seconde — y est en général abandonné : on lui préfère des mécanismes à défilement continu — aux cadences beaucoup plus élevées, atteignant dans certains cas plusieurs millions d'images par seconde — auxquels on associe un dispositif de compensation pour le mouvement de la prise de vues. Ce dispositif offre la possibilité d'obtenir des cadences de prise de vues de l'ordre de 1 000 images par seconde, et la compensation est assurée, soit à l'aide d'un miroir oscillant dont la vitesse de rotation est synchronisée avec le défilement du film, soit par l'emploi d'un prisme rotatif ou d'un tambour à miroirs. La fréquence a été sensiblement augmentée (3 000 images par seconde) par la mise au point d'appareils composés de plusieurs objectifs couplés à un disque obturateur rotatif pourvu de nombreuses fentes. Enfin, certaines prises de à vues très grande vitesse se passent d'obturateur ou de système de compensation optique ; il s'agit alors d'appareils à étincelle ou à gaz rares dans lesquels le film défile en mouvement continu, tandis que la partie de l'espace à photographier est éclairée par des illuminations très brèves. La fréquence des décharges y est de l'ordre de 100 000 impulsions par seconde, d'où, lorsqu'on y associe un système optique approprié, des instantanés au millionième de seconde.

On peut assimiler les caméras permettant des prises de vues image par image, de conception mécanique et optique beaucoup moins complexe, à des appareils photographiques à défilement vertical munis de deux magasins. Leur domaine d'utilisation est vaste et varié : microcinéma, biologie, astrophysique, etc.

## *Optique cinématographique - Objectifs*

Les qualités inhérentes aux surfaces sensibles et aux divers mécanismes d'entraînement et d'assujettissement du film conditionnent la qualité finale des images cinématographiques ; celle-ci dépend en outre de l'emploi d'optiques de plus en plus perfectionnées. L'évolution des techniques cinématographiques est en effet due, en grande partie, à l'amélioration qualitative des objectifs de prise de vues et de projection, qui a également ouvert de nouvelles perspectives à la pratique esthétique et artistique du cinéma avec, en particulier, l'apparition des anamorphoseurs et des objectifs zooms.

La fonction principale de l'objectif est de restituer correctement l'image de l'objet sur la surface sensible. Il se présente sous la forme d'un système optique convergent constitué d'un assemblage de lentilles dont la forme, la matière et l'emplacement sont l'objet de longs et minutieux calculs. Ces lentilles sont disposées précisément à l'intérieur d'une monture cylindrique dans laquelle elles peuvent être indépendantes ou bien regroupées en blocs homogènes à l'aide de baume du Canada ou de colle synthétique. Le flux lumineux pénétrant dans l'objectif est contrôlé à l'aide d'un diaphragme, situé en général entre les deux blocs principaux de lentilles. La reproduction d'un espace à trois dimensions sur la surface plane du film implique cependant la modification de facteurs esthético-techniques tels la perspective et le contraste ; elle entraîne l'apparition de paramètres nouveaux dont la profondeur de champ est l'exemple le plus significatif. Cette restitution est donc liée en grande partie aux qualités intrinsèques du système optique utilisé. En effet, si ce dernier a un pouvoir séparateur trop faible ou est entaché d'aberrations importantes, la restitution sera imparfaite et l'image résultante de médiocre qualité.

### *Définitions et principes*

La lumière blanche est composée de vibrations électromagnétiques correspondant à diverses longueurs d'onde qui, pour le spectre visible, se situent entre 0,4 et 0,7 microns. En deçà commence le domaine de l'ultraviolet, et, au-delà, celui de l'infrarouge. Dans un milieu homogène, ces ondes se propagent en ligne droite. On peut mettre en évidence cette composition de la lumière blanche en introduisant un prisme sur le trajet du rayon lumineux : on constate que le rayon réfracté prend l'aspect d'un pinceau lumineux constitué d'un certain nombre de raies colorées, et on parle alors de dispersion de la lumière. Cette constatation se fait également en employant une lentille simple ou un objectif mal corrigé : dans ce cas, la surface de l'image est entachée d'irisations ponctuelles et linéaires. De plus, lorsque la lumière rencontre une surface qui n'est ni parfaitement transparente ni polie parfaitement, elle est diffusée par cette surface. Pour obtenir une restitution optimale des sujets sur la surface sensible du film, on doit tenir compte des propriétés de la lumière blanche : réflexion, dispersion, diffusion, absorption, et apporter aux objectifs des traitements qui corrigent leurs effets.

La **distance focale** d'un objectif est la distance qui sépare son centre optique de son foyer image. Lorsque la mise au point est faite à l'infini, le foyer image se trouve à l'intersection du plan du film et de l'axe optique. Si le sujet se rapproche de l'objectif, il est nécessaire de

modifier la mise au point afin d'obtenir la netteté de l'image, ce qui s'effectue en déplaçant l'objectif par rapport au plan du film. Le déplacement maximal caractérise le tirage de l'objectif. La distance focale détermine directement l'ouverture angulaire et donc le champ d'un objectif. L'**ouverture angulaire**, exprimée en degrés, correspond à l'angle du cône qui a pour sommet le centre optique et dont la base contient le rectangle de l'image; sa valeur peut être déterminée en fonction de la distance focale et de la diagonale de l'image à l'aide d'un simple calcul trigonométrique. On constate ainsi que l'ouverture angulaire d'un objectif est inversement proportionnelle à sa distance focale. En 35 mm par exemple, l'objectif de focale normale a une ouverture angulaire de 37°, celui d'une courte focale de 20 mm a une ouverture angulaire de 68,30°, et celui d'une longue focale de 135 mm a une ouverture angulaire de 11,30°.

Un objectif est également caractérisé par son **ouverture relative**. Celle-ci détermine la quantité de lumière qui est susceptible d'impressionner la surface sensible. Le nombre d'ouverture est donné par la relation $N = \frac{f}{D}$ $f$ et D désignant la distance focale et le diamètre de l'objectif. Toutefois, cette définition de l'ouverture relative n'est pas applicable pour les objectifs composés. En effet, le diamètre du diaphragme, qui correspond à celui de la lentille dans un objectif simple, ne peut donner qu'une valeur approximative du faisceau lumineux utilisé par l'objectif; on utilise alors le diamètre de la pupille d'entrée pour déterminer l'ouverture numérique de l'objectif. Cette dimension est en moyenne supérieure de 20 % au diamètre du diaphragme. On parle dans ce cas d'**ouverture utile**, et c'est elle qui est prise comme base pour la détermination des luminosités indiquées sur la monture de l'objectif. On a donc la relation $N = \frac{f}{O}$ O désignant le diamètre d'ouverture de la pupille d'entrée; on en déduit l'ouverture relative de l'objectif : $\frac{I}{N} = \frac{O}{f}$.
Si un objectif de 80 mm de focale a une pupille d'entrée de 20 mm de diamètre, son ouverture relative est de 1/4 et son nombre d'ouverture de 4 : on dit que l'objectif est ouvert à *f*/4 ou plus simplement à 1:4.

On sait d'autre part que la surface de la pupille d'entrée est proportionnelle au carré de son diamètre et que l'éclairement reçu par la surface sensible est inversement proportionnel au carré de la distance focale, ce qui permet d'affirmer que les luminosités sont proportionnelles aux carrés des ouvertures relatives. Soit par exemple deux objectifs d'ouvertures relatives *f*/2 et *f*/6; leurs luminosités sont dans le rapport : $(1/2)^2 : (1/6)^2 = 9$. L'objectif ouvert à 1:2 est ainsi neuf fois plus lumineux que celui ouvert à 1:6 et nécessite par conséquent un temps d'exposition neuf fois moins élevé.

Dans le système international de numérotage des diaphragmes, les valeurs de N sont en progression géométrique de raison $\sqrt{2}$ et d'origine *f*/1. La suite s'établit de la manière suivante : 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22,5; 32 — à chaque ouverture de diaphragme correspond un temps de pose particulier. L'échelle des ouvertures de diaphragme ayant pour raison $\sqrt{2}$, celle des temps de pose correspondants aura pour raison 2. Cela signifie en pratique que, si l'on ferme le diaphragme d'une graduation, le flux lumineux pénétrant dans l'objectif sera réduit de moitié et qu'il faudra doubler le temps de pose pour obtenir un même éclairement de l'image. Toutefois, en cinéma, à une cadence de 24 images par seconde, le temps de pose reste constant et est égal à 1/48 s. (Notons cependant qu'il est possible de le réduire en limitant l'ouverture de l'obturateur.) La graduation des diaphragmes inscrite en blanc sur la monture de l'objectif correspond à son ouverture géométrique et sert en particulier au calcul de la profondeur de champ.

Nous avons supposé jusqu'à présent que le flux lumineux incident était intégralement transmis par l'objectif. En réalité, il n'en est rien, et les pertes de lumière peuvent même atteindre, pour certains grands angulaires, plus de 50 %, à cause de la nature même de la lumière dont une partie est absorbée par le verre et une autre réfléchie à la surface des lentilles : le facteur de transmission de l'objectif $f_{\tau}$ est égal au produit du taux d'absorption par le taux de réflexion (*tableaux* I et II).

**Tableau I**
**Taux d'absorption de la lumière dans une caméra en fonction de l'épaisseur de verre traversée**

| Épaisseur de verre (en cm) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taux d'absorption (en %) | 99,5 | 99 | 98,5 | 98 | 97,5 | 97 | 96 | 95 | 92,7 |

**Tableau II**
**Taux de réflexion de la lumière dans une caméra en fonction du nombre de surfaces air/verre traversées**

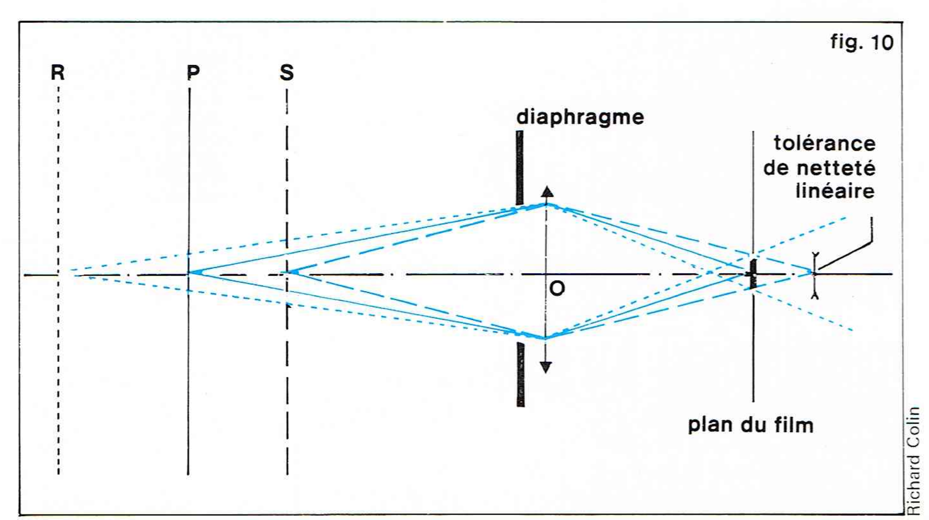
| Nombre de surfaces air/verre | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Taux de réflexion (en %) | 89,7 | 80,4 | 72,1 | 64,6 | 57,9 | 51,7 |

▲ ***Tableau I :* taux d'absorption de la lumière dans une caméra en fonction de l'épaisseur de verre traversée.**
***Tableau II :* taux de réflexion de la lumière dans une caméra en fonction du nombre de surfaces air/verre traversées.**

Cela a entraîné les constructeurs à déterminer une seconde échelle de diaphragmes pour le calcul de l'éclairement de l'image : l'ouverture photométrique dont la graduation est inscrite en rouge sur la monture des objectifs. Les objectifs utilisés sur des caméras à cellule incorporée, cas général des caméras Super 8, n'ont nullement besoin d'indication d'ouverture photométrique, puisque la mesure de la lumière est directement effectuée devant le plan du film.

La **netteté** est avant tout une notion d'ordre physiologique. L'œil ne peut en effet distinguer deux points distincts que s'ils sont suffisamment éloignés l'un de l'autre. Si, par contre, ils se rapprochent en deçà d'une certaine valeur que nous appellerons pouvoir séparateur linéaire de l'œil, ce dernier ne distinguera plus qu'un seul et unique point. Le pouvoir séparateur angulaire de l'œil a une valeur moyenne de l'ordre de 1/2 000, ce qui signifie qu'un observateur placé à 1 m d'un écran de projection pourra distinguer des points distants l'un de l'autre de 0,5 mm. En cinématographie, cependant, la netteté est également liée aux caractéristiques physiques et chimiques des instruments et des matériaux utilisés. La netteté de l'image résultante dépend, d'une part, du pouvoir séparateur de l'objectif et, d'autre part, du pouvoir résolvant de l'émulsion qui est conditionné par sa granulation et par l'irradiation qui se produit à l'intérieur de ses différentes couches.

Le **pouvoir séparateur** d'un objectif, de la même manière que celui de l'œil, se définit par une valeur angulaire ou linéaire; c'est d'ailleurs cette dernière qui présente le plus d'intérêt pour l'utilisateur. Le pouvoir résolvant d'une émulsion est caractérisé par le nombre de traits au millimètre qu'il est possible d'y distinguer (environ 50 traits au millimètre pour une émulsion de rapidité moyenne). Bien que le pouvoir séparateur d'un objectif varie en fonction de sa distance focale et de son ouverture, il est supérieur, dans la majorité des cas, au pouvoir de résolution des surfaces sensibles les plus couramment employées, aussi bien pour les pellicules réservées aux professionnels que pour celles destinées aux amateurs. On s'aperçoit donc que le seul examen du négatif ne peut pas donner des renseignements suffisamment précis sur les qualités de définition de l'objectif; c'est pourquoi on a recours à l'observation de l'image aérienne qui, après avoir traversé un collimateur, est analysée sur un verre dépoli à l'aide d'un microscope. Lorsqu'on effectue la mise au point sur un objet précis, on constate qu'une netteté acceptable définit une certaine zone autour du point considéré; cette zone, qui s'étend en deçà et au-delà de la distance de mise au point, est appelée la profondeur de champ. Il est évident qu'elle est inversement proportionnelle à la netteté demandée. En effet, seul un point précis de l'espace peut avoir une image parfaitement nette sur le plan du film. Mais l'obtention de cette netteté absolue — qui n'est, en fait,




▲ ***Figure 10 :* définitions *de la* netteté *et de la* profondeur de champ *(voir développement dans le texte).***

pas réalisable — ne présente qu'un intérêt tout relatif, car, comme nous l'avons vu, l'œil est limité par son propre pouvoir séparateur, l'émulsion par son pouvoir de résolution. La netteté acceptable sera donc celle qui ne dépasse pas les possibilités de résolution de la surface sensible et de l'œil. La définition de la **profondeur de champ** tient compte intrinsèquement de l'observation précédente. (Tout cela suppose néanmoins que l'image soit projetée et observée à des distances normales.)

En faisant intervenir la profondeur de foyer correspondante, il est possible, par un calcul assez difficile (*fig.* 10), de déterminer la formule générale de la profondeur de champ :

$$\textbf{(1)} \qquad \frac{1}{\overline{OP}} - \frac{1}{\overline{OR}} = \frac{1}{\overline{OS}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{\alpha N}{f}$$

dans laquelle $\overline{OP}$ désigne la distance de mise au point, $\overline{OR}$ celle jusqu'où la netteté sera acceptable, $\overline{OS}$ celle à partir de laquelle la netteté sera acceptable, $\alpha$ la tolérance de netteté angulaire, N le nombre d'ouverture du diaphragme et $f$ la distance focale. On constate que la profondeur de champ est proportionnelle à la tolérance de netteté angulaire et au nombre d'ouverture : c'est-à-dire que, pour un objectif donné, il y aura plus de profondeur de champ à $f/16$ qu'à $f/2,8$ pour la même distance de mise au point. Elle est également inversement proportionnelle à la distance focale : pour une même distance de mise au point, un grand angulaire aura une plus grande profondeur de champ qu'un objectif de longue focale. On constate également que si la distance $\overline{OR}$ tend vers l'infini, la relation **(1)** s'écrit :

$$\textbf{(2)} \qquad \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{1}{\overline{OS}} - \frac{1}{\overline{OP}} = \frac{\alpha N}{f}$$

d'où l'on déduit :

$$\textbf{(3)} \qquad \overline{OP} = \frac{f}{\alpha N}$$

et $\qquad \overline{OP} = 2\,\overline{OS}.$

Cette valeur de $\overline{OP}$ **(3)** s'appelle la distance hyperfocale. Lorsqu'on effectue la mise au point à cette distance, la profondeur de champ s'étend sur une distance allant de la moitié de l'hyperfocale jusqu'à l'infini. La distance hyperfocale peut également être définie à l'aide de la tolérance de netteté linéaire $\rho$ :

$$\overline{OP} = \frac{f^2}{\rho N} \qquad \text{avec } \alpha = \frac{\rho}{f}$$

Dans certaines caméras d'amateurs qui ne possèdent pas de bague de mise au point, l'objectif est réglé définitivement sur l'hyperfocale.

## *Les différents types d'objectifs*

Un objectif cinématographique est utilisé dans un but précis, ce qui détermine les recherches des constructeurs et les oblige à adopter un type d'objectif particulier. Ce choix fait, les recherches s'orientent alors en vue de l'élimination totale ou partielle des aberrations inhérentes à l'objectif lui-même. Sa qualité finale, quelles que soient ses caractéristiques (distance focale, luminosité, etc.), dépendra donc de l'habileté avec laquelle les constructeurs ont pu supprimer ces différentes aberrations, qui peuvent être simples ou complexes — dans ce dernier cas leur détermination et leur correction posent un problème particulièrement délicat. On distingue :

* *L'aberration sphérique de l'image.* L'image d'un point situé sur l'axe optique est entourée d'un halo lumineux, parce que les lentilles sont moins convergentes au centre que sur les bords. Les rayons marginaux engendrent une courbe caustique de révolution autour de l'axe, le long de laquelle se produit une accumulation de lumière. Cette aberration est en partie corrigée si la lentille convergente présente sa face convexe en direction du sujet. On peut aussi la réduire en diaphragmant ; c'est ainsi qu'on peut la négliger à partir d'une ouverture de 1:8. Cependant, en cinéma, on a très souvent recours à des ouvertures de 1:2,8, auquel cas l'aberration de sphéricité se corrige par association de lentilles convergentes et divergentes, le défaut des unes compensant le défaut des autres. Lorsqu'un objectif est corrigé de son aberration de sphéricité, la courbure représentant l'aberration longitudinale se trouve repliée.

* *L'aberration en dehors de l'axe : la coma.* Celle-ci apparaît lorsque le système optique ne vérifie pas la condition des sinus d'Abbe : $\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = c^{te}$, où $\alpha$ et $\alpha'$ désignent respectivement les angles du rayon incident et du rayon émergent. Pour plus de facilité, on peut l'assimiler à l'aberration sphérique des rayons obliques. Le faisceau étant dissymétrique, la coma, contrairement à l'aberration de sphéricité, se présente sous la forme d'un halo lumineux allongé rappelant la queue d'une comète. On la corrige en diaphragmant et en associant des lentilles qui corrigent mutuellement leurs propres aberrations. Les objectifs sans aberration de sphéricité et sans coma sont dits aplanétiques : ils donnent des images nettes au centre et sur les bords.

* *L'aberration d'inclinaison : l'astigmatisme.* De même que la coma, l'astigmatisme concerne les rayons lumineux qui sont très inclinés sur l'axe. Le pinceau émergent passe par deux droites focales orthogonales, dites focales de Sturm, qui sont les focales tangentielle et sagittale. La distance séparant ces deux focales détermine la valeur de l'astigmatisme. En pratique, il est impossible d'obtenir simultanément des lignes verticales et horizontales nettes. Un compromis acceptable peut néanmoins être établi entre ces deux focales à l'endroit du cercle de moindre diffusion. Pour réduire cette aberration, il faut diminuer la distance qui sépare les deux focales de Sturm : on s'y applique en associant plusieurs lentilles ou en utilisant un mécanisme convergent. Lorsque les deux focales peuvent être considérées comme confondues pour une partie suffisamment grande du champ, on dit qu'il y a stigmatisme approché.

* *La courbure de champ.* Elle est due à ce qu'il est impossible d'obtenir simultanément la netteté au centre et sur les bords de l'image. Comme nous l'avons vu, un objectif corrigé pour l'astigmatisme ne présente plus qu'une seule surface focale. Mais cette dernière n'est pas plane et présente au contraire une certaine concavité en direction de l'objectif. Si, de ce fait, la mise au point est opérée pour un objet situé sur l'axe optique, les rayons provenant des extrémités du champ donnent des images nettes en avant du plan du film. De toutes les aberrations, la courbure de champ est la plus difficile à corriger. Elle peut néanmoins être limitée par des associations adéquates de lentilles de formes et de verres différents. Les objectifs corrigés pour l'astigmatisme et la courbure de champ sont dits anastigmats.

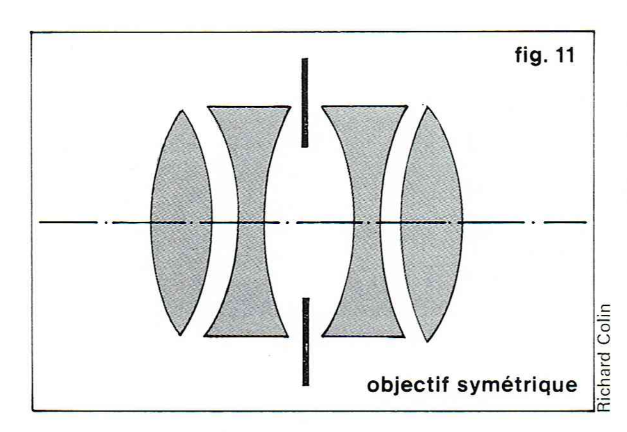
* *La distorsion.* Cette aberration n'affecte pas la netteté de l'image, mais la forme de ses lignes. Le parcours des rayons émergents extrêmes, qui est plus long que celui des rayons centraux, provoque un agrandissement supérieur des bords de l'image. Le sens de la distorsion ne dépend que de la position du diaphragme. Si celui-ci est placé en avant de la lentille, la distorsion est dite en barillet ; dans le cas contraire, elle est dite en croissant. L'objectif symétrique à diaphragme central est corrigé de distorsion ; les doubles symétriques sont dits orthoscopiques ou rectilinéaires.

* *L'aberration chromatique.* Contrairement aux aberrations précédentes, qui sont d'ordre géométrique, l'aberration chromatique est directement liée à la nature composite de la lumière blanche. Une lentille peut être assimilée à une suite infinie de microprismes dispersant la lumière blanche en faisceaux de différentes couleurs. Les faisceaux coupent l'axe optique à des endroits différents et, d'un même objet, donnent plusieurs images concentriques en différentes couleurs spectrales : il y a donc chromatisme de position et chromatisme de grandeur. Ce dernier, qui est indépendant de la distance focale, est le plus difficile à corriger. Plusieurs types d'objectifs peuvent néanmoins le limiter : c'est le cas de la lentille achromatisée qui est l'association d'une lentille convergente en crown dense et d'une lentille divergente en flint léger. L'apparition du cinéma en couleurs, utilisant des émulsions panchromatiques, a imposé la correction chromatique complète des objectifs pour les différentes longueurs d'onde du spectre.

Ces quelques considérations concernant les aberrations des objectifs nous permettent d'imaginer l'importance et la difficulté des travaux mis en œuvre depuis plus d'un siècle en vue de les corriger. Les objectifs modernes auxquels on demande une grande luminosité et un angle de champ important ne peuvent évidemment pas être parfaitement corrigés de toutes ces aberrations. Selon l'emploi auxquels ils les destinent, les constructeurs peuvent favoriser la correction d'une ou de plusieurs aberrations particulières. Les objectifs utilisés en cinéma professionnel sont dits universels : dépourvus de toute aberration notoire. Les objectifs les plus simples, équipant les appareils d'amateurs, peuvent n'être composés que d'une seule lentille, fortement diaphragmée, en forme de ménisque. L'objectif achromatique, l'objectif rectiligne à deux lentilles et le simple ménisque ne peuvent cependant plus satisfaire les exigences toujours croissantes des amateurs. Les objectifs modernes utilisés en cinématographie peuvent tous être rapportés à trois types fondamentaux. Il est d'ailleurs étonnant de constater que les recherches effectuées à partir de types différents ont abouti à la réalisation d'objectifs de mêmes caractéristiques et semblables en de nombreux points.

**Objectifs de type symétrique** (*fig.* 11)

Comme leur nom l'indique, ces objectifs se présentent sous la forme de deux blocs de lentilles disposés symétriquement autour du diaphragme. Les lentilles peuvent être accolées ou indépendantes. Dans le premier cas, l'objectif offre l'avantage de ne présenter que quatre surfaces air/verre, donnant ainsi à l'image un piqué de très bonne qualité. Les anastigmats symétriques à 6 ou 8 lentilles donnent une bonne correction de toutes les aberrations et permettent d'utiliser un champ assez étendu. Leur faible luminosité a cependant imposé aux constructeurs l'introduction d'intervalles d'air dans leurs différentes combinaisons. Le deuxième cas (lentilles indépendantes) présente une plus large gamme de possibilités quant à la réduction des aberrations résiduelles et à l'augmentation de la luminosité. En utilisant les lentilles sous forme de ménisques, on obtient un objectif symétrique de type Gauss qui, accompagné de collages et de dédoublements adéquats, permet l'obtention de luminosités importantes.




◄ *Figure 11 :* objectif symétrique*; il comprend deux blocs de lentilles disposés symétriquement autour du diaphragme; le système représenté ici est un anastigmat à quatre lentilles indépendantes.*

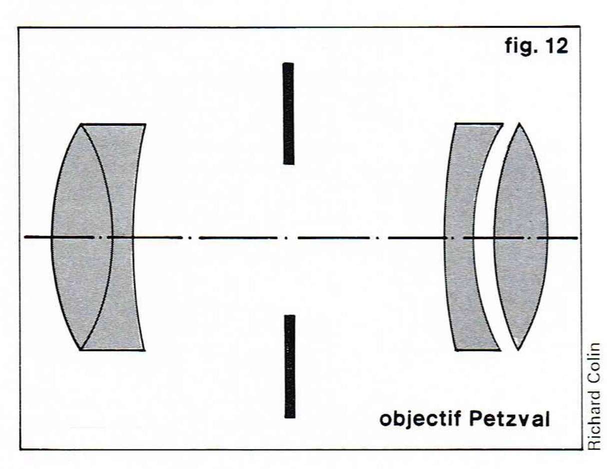
**Objectifs du type Petzval** (*fig.* 12)

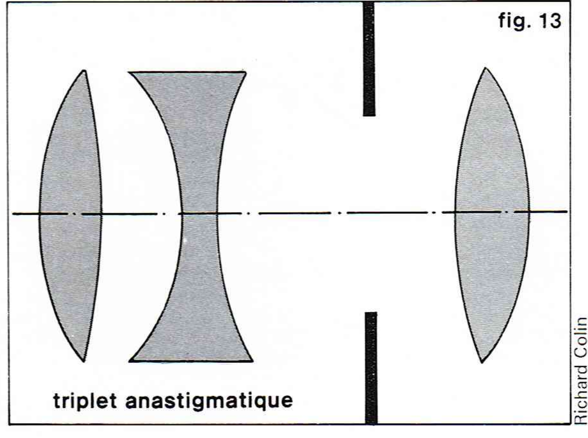
Ces objectifs ont été calculés et mis en équation par Petzval dès 1840. A l'origine, ils se composaient de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure étant traversée par un espace d'air. L'objectif de Petzval (dès sa création, il avait déjà une très grande ouverture) fut particulièrement bien accueilli à l'époque du daguerréotype qui nécessitait de très longs temps de pose. Cependant, ses limites furent rapidement atteintes, et l'étroitesse de son champ, son astigmatisme et son aberration chromatique résiduelle le réservèrent à des utilisations bien particulières. Malgré les nombreuses améliorations qu'il a subies depuis lors, cet objectif reste destiné exclusivement à la projection et à la prise de vue de portraits.

**Objectif triplet** (*fig.* 13)

Cet objectif anastigmatique fut mis au point en 1893 par l'opticien anglais Taylor. Sa constitution était alors fort simple : une lentille convergente, une lentille divergente à proximité de laquelle se trouvait le diaphragme et, enfin, une lentille postérieure convergente. Dans cette version originale, le triplet était entaché de courbure de champ. De nos jours, lorsque l'ouverture n'est pas trop large, son emploi est pleinement justifié pour les appareils de petit format. De nombreuses formes dérivées ont été réalisées à partir de cette version simple. La première d'entre elles consiste à joindre une lentille divergente à la lentille convergente postérieure : ainsi a été réalisé le Tessar de Zeiss. La correction des aberrations géométriques est complète pour une ouverture relativement importante de *f*:2,8. Il présente également l'avantage de pouvoir être mis au point par simple déplacement de la lentille frontale. Enfin, un grand nombre de formes dérivées ont été mises au point par collage de lentilles supplémentaires ou dédoublement des lentilles latérales. La luminosité de ces objectifs a pu ainsi être poussée à l'extrême aussi bien pour les longues que pour les courtes focales. Tout en conservant le système triplet, la tendance actuelle observée par les calculateurs est de se rapprocher d'une certaine symétrie, soit par la forme des lentilles, soit par l'indice des verres utilisés.

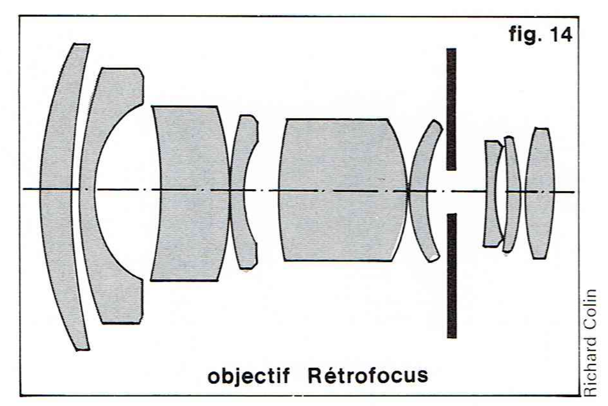
Les trois types d'objectifs que nous venons de voir ne peuvent plus satisfaire pleinement les besoins des professionnels et des amateurs. L'usage de focales extrêmes




◄ *Figure 12 :* objectif Petzval*; cet objectif est composé de deux blocs de lentilles dissymétriques, la combinaison postérieure présentant un espace d'air.* *Figure 13 :* objectif triplet *anastigmatique dans sa version originale.*

▶ *Figure 14 : principe du Rétrofocus ; cet objectif comprend de grands ménisques divergents très éloignés du centre, ce qui augmente le tirage de l'appareil.*




s'est fait de plus en plus fréquent, et l'emploi du travelling mécanique a laissé place — en particulier chez les amateurs — à celui du travelling optique : le « zoom » présente l'avantage incontestable de pouvoir réunir sous une même monture une infinité de focales. Les constructeurs ont dû s'efforcer de mettre au point des objectifs de types nouveaux, pourvus des mêmes qualités que les objectifs classiques les plus perfectionnés.

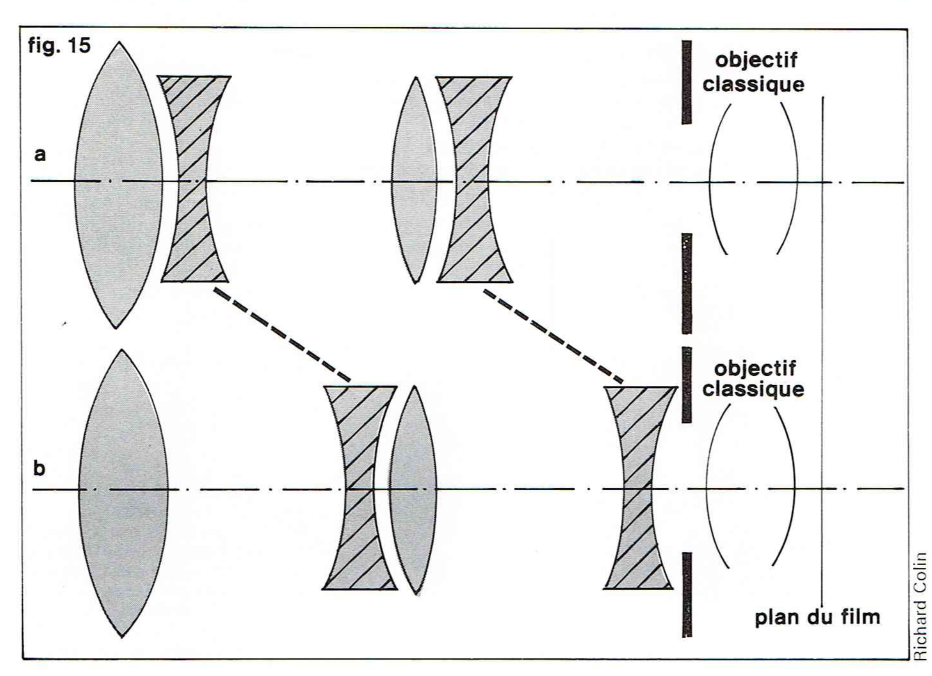
**Grands angulaires — Rétrofocus** (*fig.* 14)

Les dérivés du type Gauss ne permettaient pas l'obtention d'angles de champ supérieurs à 70°. Un nouveau type d'objectif est né par adjonction de grands ménisques divergents de chaque côté de la combinaison centrale. La qualité des images est excellente, et l'angle de champ peut atteindre 90°. Cependant, les ensembles divergents étant très éloignés du centre, ces objectifs présentent l'inconvénient d'être fort encombrants. D'autre part, il s'est avéré impossible d'adapter ces nouveaux grands angulaires aux caméras utilisant la visée reflex sur prisme ou sur obturateur : la place nécessaire à l'introduction du système de visée est devenue trop réduite. Cette difficulté a été surmontée par la création d'un grand angulaire de type nouveau : le rétrofocus. Celui-ci peut être assimilé à un téléobjectif retourné ; il se compose d'un ensemble frontal divergent de grand diamètre, séparé nettement d'un système arrière convergent. Le tirage résultant d'une telle combinaison peut être très important. A focale égale, la distance séparant la dernière lentille du plan du film est beaucoup plus grande dans un rétrofocus que dans un grand angulaire classique.

▼ *Figure 15 : principe de l'objectif zoom à compensation optique ; a, position grand angle, b, position téléobjectif.*

**Longues focales — Téléobjectif**

Des objectifs à longue et à très longue focales ont pu être mis au point par transformation plus ou moins complexe des trois types de base. On arrive ainsi à fabriquer des objectifs ayant jusqu'à 1 000 mm de distance focale. De telles réalisations sont cependant très encombrantes, car le tirage des appareils est sensiblement égal à leur distance focale, et c'est pour pallier cet inconvénient que les constructeurs ont été amenés à créer le téléobjectif. Ce dernier est composé d'un ensemble frontal convergent suivi d'un système divergent. A grandissement égal, donc à focale égale, cette disposition permet de réduire notablement le tirage de l'objectif et, par suite, son encombrement. L'introduction de cet élément divergent devant le plan du film entraîne toutefois l'apparition de nombreuses aberrations (astigmatisme et distorsion) et réduit considérablement la luminosité de l'ensemble. L'appellation « téléobjectif » est fréquemment utilisée de nos jours pour désigner des objectifs à long foyer et à tirage réduit, qui ne sont en fait que des formes dérivées des trois types classiques.




**Objectifs à focale variable** (*fig.* 15)

Les premières réalisations de ce type d'objectifs ont commencé après la Seconde Guerre mondiale. Les zooms, principalement mis au point pour les formats 8 et 16 mm, avaient à cette époque une amplitude limitée à deux ou trois. La meilleure qualité des verres optiques et les progrès obtenus par la généralisation des calculs électroniques ont permis très rapidement de réaliser des objectifs à focale variable de grande amplitude (de 5 à 20), dont les caractéristiques pouvaient être comparées à celles des objectifs classiques. De nos jours, des objectifs zooms de grande qualité sont également conçus pour le cinéma professionnel ; la variation de focale peut dans ce cas être réalisée électriquement à l'aide de micromoteurs de différentes vitesses. D'une manière générale, l'objectif zoom doit assurer une luminosité, un tirage optique et un pouvoir séparateur constants au cours des différentes variations de focale. Il est constitué d'un objectif ordinaire à l'avant duquel est interposé un système afocal à grandissement variable. La mise au point est très souvent obtenue par simple déplacement de la lentille frontale convergente, et la luminosité de l'ensemble est régulée par un diaphragme situé en avant de l'objectif normal. A elle seule, cette disposition ne permettrait cependant pas d'assurer une correction convenable des aberrations et provoquerait un déplacement du plan image en fonction des variations de focale. Le groupe frontal de mise au point doit donc être constitué de plusieurs lentilles convergentes et divergentes — certains constructeurs ont d'ailleurs adopté un groupe frontal divergent afin de limiter l'encombrement de l'objectif —, et le déplacement du système afocal doit être compensé par la variation d'un autre groupe mobile. Cette compensation peut être effectuée par voie optique (déplacement d'un groupe de lentilles) ou mécanique (système compensateur à cames ou à engrenages). La réduction des aberrations et le mécanisme compensateur nécessitent la mise en œuvre de nombreuses lentilles qui diminuent considérablement la luminosité du système. On peut d'ailleurs considérer qu'il existe en moyenne une différence d'un diaphragme entre les ouvertures géométriques et photométriques des objectifs à focale variable.

## *Conception et réalisation*

La conception et la fabrication des objectifs cinématographiques font l'objet de longues et constantes recherches dans les domaines des mathématiques et des techniques optiques. Jusqu'à la première moitié du XXe siècle, ces recherches pouvaient durer plusieurs années pour la seule fabrication d'un objectif de quatre à cinq lentilles. La qualité des objectifs modernes, en particulier celle des zooms et des grands angulaires, n'aurait jamais pu être atteinte sans l'emploi de l'ordinateur et des méthodes de calcul électronique. Ces ensembles permettent en effet le calcul automatique des diverses corrections à effectuer et le stockage d'un nombre illimité de données numériques et d'instructions codifiées. L'ouverture relative, l'angle de champ et le mode de construction sont les données qui conditionnent l'élaboration d'un objectif déterminé ; les recherches s'orientent ensuite vers l'amélioration de ses qualités d'ensemble (réduction des aberrations à toutes les distances de mise au point).

L'opération de fabrication débute lorsque tous les paramètres et les cotes des différents éléments de l'objectif sont déterminés avec précision. La fabrication des verres en est la première étape : ceux-ci sont en général composés d'un mélange de silice, d'alcali, de chaux, d'oxyde de baryum et d'acide borique, le tout étant chauffé à environ 1 500 °C et refroidi très lentement. Le bloc réfractaire est ensuite brisé à la masse, et les morceaux de verre sont récupérés et soigneusement vérifiés. Une fois cette opération terminée, les indices de réfraction des verres étant conformes aux déterminations mathématiques, a lieu le moulage, puis l'usinage des lentilles, effectué à l'aide d'un système rotatif recouvert d'une substance abrasive.

On procède ensuite au traitement de surface des verres, de façon à éliminer partiellement les réflexions parasites. La technique industrielle du traitement des lentilles par vaporisation de substances anti-reflets a été mise au point en Allemagne en 1936. Avant cette date, il était nécessaire de limiter à 6 ou 8 les interfaces air-verre du fait des réflexions qui se produisaient sur chacune d'elles et des pertes de contraste et de luminosité qui en résultaient. La réflexion des rayons incidents à la surface d'une lentille est donnée par la relation

$$\rho = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}$$

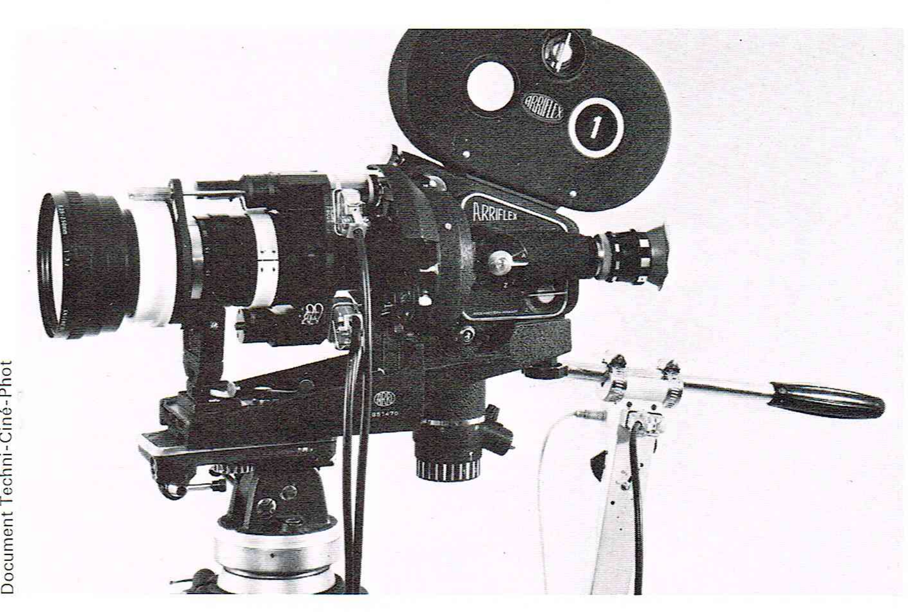
$n_0$ et $n_1$ étant respectivement les indices de l'air et du verre considéré. Pour réduire cette réflexion parasite, on effectue sur le verre une projection cathodique de fluorure de métal léger (lithium, magnésium, sodium...), fine pellicule qui recouvre entièrement et uniformément la lentille. Le principe de ce traitement est fondé sur la superposition de deux mouvements vibratoires qui s'annulent par interférence lorsqu'ils sont d'amplitude égale et en opposition de phase. Les interférences créées par les deux mouvements vibratoires dépendent directement de l'épaisseur de la couche du traitement de surface et de son indice de réfraction. Pour qu'il y ait interférence destructive, cette épaisseur doit être égale ou proportionnelle au quart de la longueur d'onde pour laquelle le traitement est effectué, et l'indice de réfaction $n_2$ du matériau doit vérifier la relation $n_2 = \sqrt{n_1}$, $n_1$ étant celui du verre. En général, on effectue ce traitement pour la raie jaune du sodium de 0,55 $\mu$ : seul le jaune est transmis, ce qui crée le reflet pourpre caractéristique des objectifs traités. Le traitement de surface améliore le pouvoir séparateur et la luminosité des objectifs tout en protégeant les verres contre les attaques des agents atmosphériques. La dernière opération de fabrication consiste à sertir les lentilles dans des montures métalliques et à les positionner rigoureusement dans une monture cylindrique en assurant une parfaite coïncidence de leurs axes optiques.

## La projection

La projection est l'ultime étape de l'itinéraire du film. Elle a pour but de réaliser sur un écran une reproduction quasi parfaite des images enregistrées lors de la prise de vue. Dans le cadre du cinéma commercial, cette opération s'effectue dans des salles de spectacle spécialement aménagées. Elle est généralement réalisée à l'aide d'un appareil de projection et d'un écran plan. Cependant il existe, en nombre très limité, des salles de spectacle permettant des projections multiples pouvant aller dans certains cas jusqu'au panorama total. Bien que les moyens mis en œuvre par les amateurs soient plus limités, la projection de films de format réduit nécessite un certain nombre de dispositions particulières : projecteurs portables, vitesse de défilement variable, possibilité de marche arrière et de réenroulement du film, etc. Le cinéma scientifique, de son côté, réclame l'emploi de projecteurs d'analyse, du type « Analector », qui permettent l'arrêt sur image et des cadences très faibles de défilement du film.

### L'appareil de projection

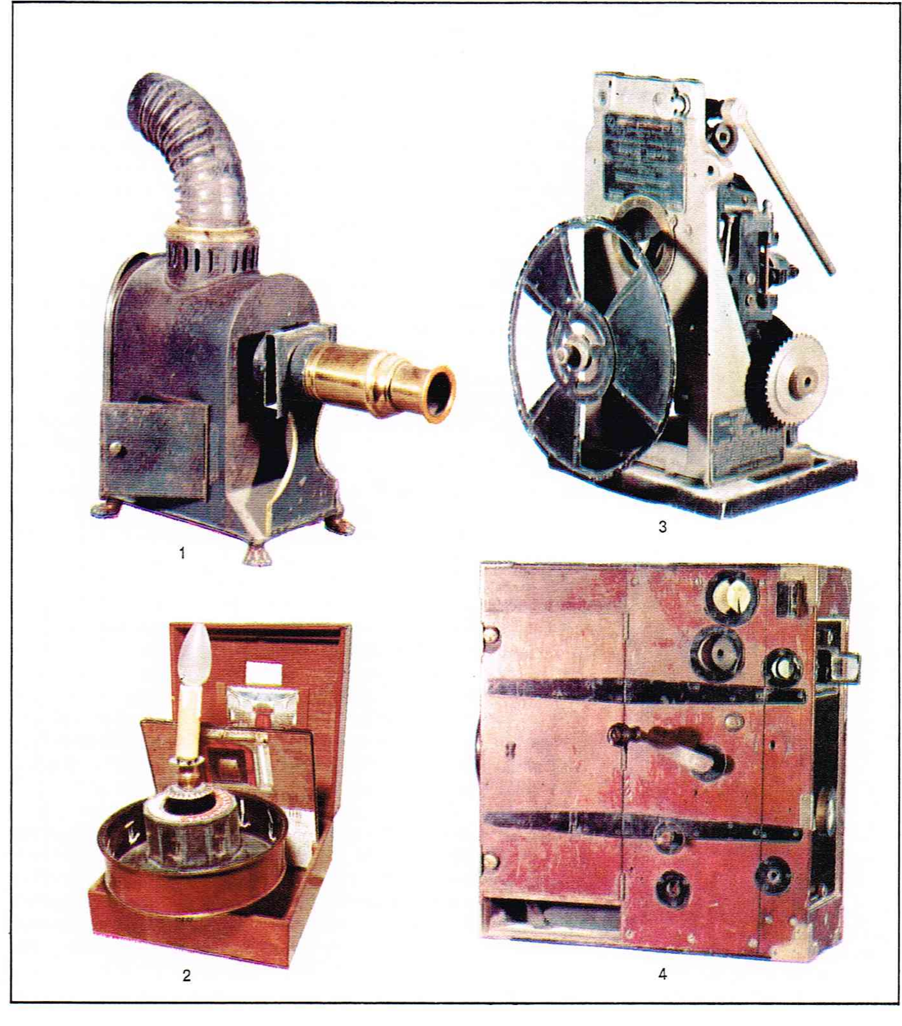
Les copies standard d'exploitation destinées à la projection dans les salles de spectacle sont en général des films 35 mm (parfois 16 mm) dotés d'une piste sonore photographique. La reproduction sonore peut également être effectuée sur une ou plusieurs pistes magnétiques disposées de part et d'autre des images. Cette seconde solution est adoptée pour les restitutions stéréophoniques de projections panoramiques, tel le cinémascope, et par les amateurs qui introduisent une piste magnétique en bordure des images pour la projection sonore de films Super 8. Enfin, un autre procédé consiste à projeter simultanément sur un même appareil une bande image et sa bande son correspondante, ce qui est réalisé à l'aide des projecteurs « double bande » qui assurent en synchronisme l'entraînement des deux films.




Document Techni-Ciné-Phot

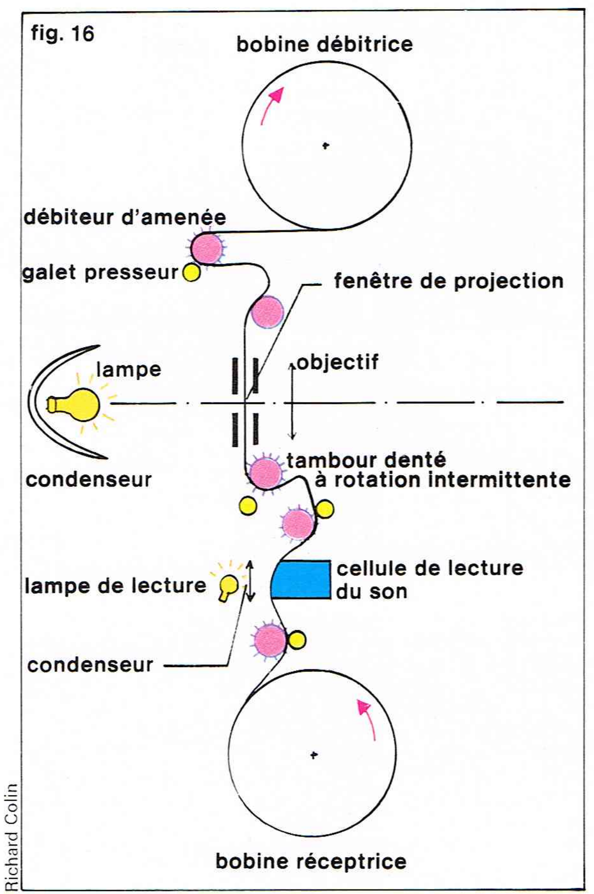
▲ ***Un objectif zoom Angenieux 25/250 mm commandé électriquement.***

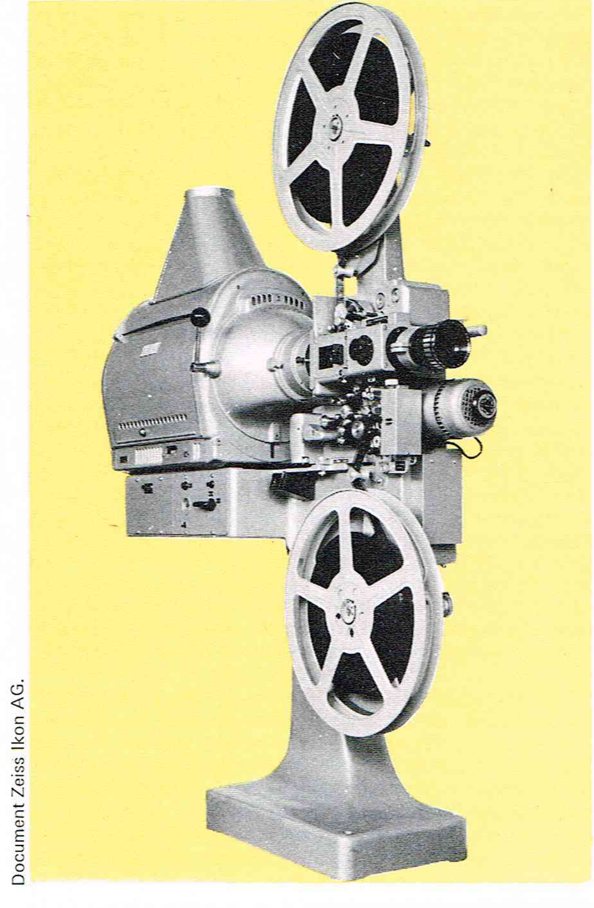
▼ ***Quelques anciens appareils de projection : 1, une lanterne magique ; 2, le praxinoscope réalisé par Reynaud en 1879 ; 3, le kinétoscope d'Edison, breveté en 1891 ; 4, la caméra fabriquée en 1913 par la Custom House de New York.***




Nat's Photo    Nat's Photo    Archivio I.G.D.A.    Archivio I.G.D.A.

▶ *A gauche, figure 16 : principe de fonctionnement d'un projecteur de cinéma. A droite, un projecteur professionnel pour films 35 mm.*




La fonction de l'appareil de projection est de restituer en synchronisme les images et les sons enregistrés lors du tournage du film. La restitution des images s'effectue sur un écran de projection, et celle des sons dans la salle entière, par l'intermédiaire de haut-parleurs appropriés. Le principe de fonctionnement du projecteur est sensiblement identique à celui de la caméra (*fig.* 16) : le film est extrait du magasin supérieur à l'aide d'un débiteur d'amenée; après avoir effectué une boucle, il s'engage dans le couloir de projection à la sortie duquel un tambour denté lui impose une traction intermittente; après une seconde boucle, un débiteur lui communique à nouveau un mouvement de descente continue; le film passe alors devant une tête de lecture sonore avant de terminer sa course dans le magasin récepteur. Un obturateur circulaire assure l'obstruction des rayons lumineux provenant de la lanterne de projection pendant l'escamotage des images. Afin de conserver un parfait synchronisme entre les images et les sons, les copies standard d'exploitation présentent un décalage constant entre la bande image et la bande son, fixé à 20 images pour les films de format 35 mm (26 images pour le format 16 mm). Dans le projecteur, la lecture du son est effectuée 20 images après la fenêtre de projection.

**Le mécanisme d'entraînement intermittent** permet, 24 fois par seconde, de réaliser la descente du film sur une hauteur égale à une image. Dans l'appareil de prise de vues, la descente des griffes s'effectue pendant un tiers du temps d'escamotage d'une image, l'obturateur restant fermé durant la moitié de ce temps. A la projection, la réduction du phénomène de scintillement impose un temps de descente des mécanismes intermittents inférieur ou égal à un quart du temps total, afin de permettre la réalisation de deux impulsions et de deux obturations pour une même image. Le cycle d'escamotage d'une image s'effectue donc de la manière suivante : descente du film durant 1/96 s et immobilisation durant 3/96 s. Le système d'entraînement par griffes mis en œuvre dans les caméras a été totalement délaissé dans les appareils de projection; la traction du film y est en effet beaucoup plus forte et l'utilisation journalière du mécanisme beaucoup plus longue (jusqu'à 12 heures).

Le choix s'est porté sur un entraînement intermittent par tambour denté. Ce dernier, de constitution mécanique plus robuste, permet d'exercer sur le film une traction répartie sur plusieurs paires de perforations : le maintien du film est assuré par un système de galets presseurs. La solution universellement adoptée pour imprimer à ce débiteur une rotation intermittente est celle mettant en œuvre un dispositif à « croix de Malte ». La croix, solidaire du tambour denté, est une pièce métallique composée de quatre secteurs circulaires concaves séparés par quatre rainures orthogonales. Son mouvement intermittent est engendré par un plateau à ergot monté sur un arbre à rotation continue. Un tour complet effectué par le disque correspond à une rotation de 1/4 de tour de la croix de Malte. Le cycle d'escamotage d'une image,




▶ *Un projecteur amateur et semi-professionnel pour films 16 mm.*

correspondant à la rotation complète du plateau, se traduit mécaniquement par :

— la rotation d'un quart de tour de la croix de Malte, provoquée par l'engagement de l'ergot dans l'une de ses quatre rainures ; durée : 1/96 s ;

— l'immobilisation de la croix de Malte (durée : 3/96 s), assurée par un disque solidaire du plateau qui s'applique très exactement contre l'un des quatre secteurs concaves de la croix.

Le mécanisme de croix de Malte étant soumis à d'importants efforts, les différents organes qui le constituent sont réalisés dans des aciers trempés à haute résistance, et l'ensemble est disposé à l'intérieur d'un carter rempli d'huile. D'autre part, la stabilité verticale des images exige un centrage parfait de la croix de Malte ainsi qu'un usinage précis de ses rainures et de ses secteurs circulaires. Certains constructeurs ont adopté le mécanisme de croix de Malte accéléré, qui consiste à accroître la vitesse du plateau lorsque l'ergot est engagé dans une rainure de la croix : cette accélération est réalisée dans la plupart des cas par l'intermédiaire d'un plateau-manivelle. Notons également que les appareils de format 16 mm font intervenir une croix à huit branches dotée d'un mouvement accéléré.

Seuls, certains projecteurs de format réduit, ainsi que ceux destinés à la réalisation de transparence, font encore usage d'un mécanisme d'entraînement par griffes : outre sa fragilité, ce dispositif mécanique n'assure que partiellement l'immobilisation du film lors de la projection.

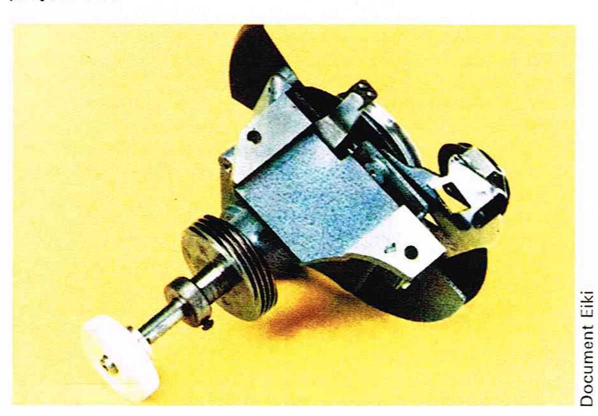


Archives Snark

▲ *Edison projetant un film avec un projecteur de sa fabrication.*

**L'obturateur** doit assurer l'obstruction du rayon lumineux pendant la descente du film. Il doit également, afin de réduire le phénomène de scintillement, être en mesure de couper une seconde fois le rayon lumineux durant la période d'immobilisation du film. Le nombre des obturations est donc le double de celui des escamotages d'images : un cycle de 1/24 s correspond à deux obturations de 1/96 s et à deux impulsions de 1/96 s. Si un système d'entraînement permet une descente plus rapide du film (mécanisme de croix de Malte accéléré), l'ouverture de l'obturateur peut être agrandie afin d'augmenter la durée totale de la projection. L'obturateur de type tronconique est la solution la plus usitée sur les projecteurs de modèle récent. Il permet de limiter considérablement l'angle mort d'obturation en coupant le faisceau lumineux dans sa section minimale, c'est-à-dire en arrière et le plus près possible de la fenêtre de projection. Une diminution plus importante de l'angle mort peut encore être obtenue en faisant tourner l'obturateur à raison de deux tours par cycle. Il convient alors d'utiliser un obturateur dissymétrique dont la pale unique, ouverte à 180°, fait alternativement office de pale d'escamotage et de pale de scintillement.

**La lampe de projection** assure l'éclairement de l'écran en concentrant sur le film une forte intensité lumineuse. Sa puissance est choisie en fonction de l'agrandissement et de la distance à laquelle est effectuée la projection. Dans cette détermination, il faut également tenir compte des différentes absorptions que subit le faisceau lumineux tout au long de son trajet, l'utilisation finale de ce dernier n'excédant que rarement 10 % de sa valeur initiale. On emploie de nos jours trois types distincts de lampes de projection :



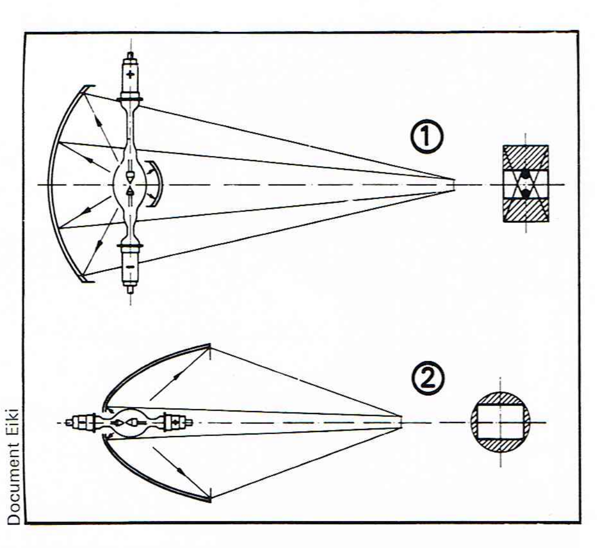
Document Eiki

— la plus ancienne source de lumière utilisée a été celle produite par les lampes à arc à charbons. A l'origine, la décharge était entretenue entre deux bâtonnets de charbon qui jouaient les rôles d'anode et de cathode. Le cratère du charbon positif, qui constituait la source essentielle du flux lumineux émis, était situé au foyer d'un système optique qui concentrait l'énergie lumineuse sur le plan du film. Le rendement offert par cette solution était cependant relativement faible. On eut alors recours à une minéralisation plus poussée de la mèche du charbon positif, qui, accompagnée d'une inclinaison adéquate du charbon négatif, permit l'obtention d'arcs à haute intensité : leur rendement lumineux pouvait atteindre 70 lumens par watt. Un des derniers perfectionnements consiste à insuffler sur le cratère du charbon positif un jet d'air continu qui augmente sa brillance en évacuant rapidement ses gaz d'émanation. La lumière émise par l'arc à haute intensité présente des caractéristiques identiques à la lumière solaire ;

— le second type de lampe de projection est fondé sur le phénomène de rayonnement par incandescence des corps portés à haute température. Le rayonnement lumineux est obtenu par l'incandescence d'un filament de tungstène traversé par un courant électrique. L'amélioration la plus récente consiste à introduire de l'iode à l'état gazeux à l'intérieur des ampoules. A haute température, l'iodure de tungstène se dissocie, et l'iode ainsi formé assure une régénération continuelle du filament de tungstène. La température d'incandescence peut être ainsi sensiblement augmentée sans porter atteinte à la durée de vie de la lampe. Les lampes à cycle d'iode, de dimensions et d'encombrement très réduits, conviennent particulièrement bien aux projecteurs d'amateurs ;

— pour l'illumination des écrans de grandes dimensions, l'utilisation de lampes à décharge a récemment offert la solution la plus satisfaisante. Ces lampes sont constituées de deux électrodes scellées à l'intérieur d'un tube de verre rempli d'un corps à l'état gazeux. Lorsqu'une certaine différence de potentiel est appliquée aux bornes des électrodes, les molécules du gaz passent d'un état fondamental à un état excité, puis redescendent à un état proche du fondamental en émettant un rayonnement d'une certaine fréquence. La radiation émise, qui ne

◀ *L'obturateur à griffes d'un projecteur 16 mm* Eiki *; ce dispositif d'entraînement de film ne possède pas de croix de Malte.*




▶ ***Figure 17 :* les condenseurs à miroirs d'un appareil de projection de films; 1, lampe au xénon de type vertical; l'image de la lampe forme un rectangle vertical; 2, lampe au xénon de type horizontal; l'image produite sur le cache est circulaire.**

dépend que du gaz utilisé, a l'aspect d'un spectre de raies. L'intensité du rayonnement peut être augmentée en alimentant la lampe au moyen de très brèves impulsions de forte tension. Les premières lampes à décharge réalisées ne donnaient cependant pas une qualité de lumière compatible avec la projection de films en couleurs : le spectre émis restait déséquilibré et présentait une forte dominante bleu-vert due à l'absence de rayonnement rouge. L'équilibrage du spectre est obtenu de nos jours en employant des lampes à atmosphère de xénon. La décharge, entretenue au moyen d'impulsions de tension, a lieu dans des ampoules à haute pression gazeuse. L'intensité du rayonnement y est très forte, et le spectre de raies du xénon est sensiblement équivalent à un spectre continu de lumière blanche. L'équilibrage du spectre peut également être accompli en employant des lampes à iodures métalliques. Elles se présentent sous la forme de lampes à vapeur de mercure (principalement composées d'argon auquel a été ajoutée une goutte de mercure), dans lesquelles ont été introduits des halogénures métalliques dont l'émission spectrale se situe principalement dans le rouge (iodure de zinc, de thallium, etc.). Ces lampes, qui atteignent des rendements lumineux de l'ordre de 100 lumens par watt, admettent d'être équilibrées à différentes températures de couleur.

A chaque lampe de projection doit être associé **un système optique condenseur,** destiné à concentrer le flux lumineux sur le plan du film. Les principaux systèmes condenseurs utilisent les propriétés optiques des miroirs elliptiques et des lentilles convergentes (*fig.* 17). Le choix d'un système particulier est en grande partie dicté par la nature et la direction du rayonnement émis par la lampe de projection. Dans le cas des lampes au xénon de type vertical, on associe à la lampe un miroir sphérique de petites dimensions qui renvoie le flux lumineux sur un miroir elliptique placé en arrière de la lanterne de projection. On obtient ainsi une uniformisation de la luminance de la décharge tout en limitant les pertes d'énergie lumineuse. Pour les projecteurs de format réduit, les lampes à incandescence sont équipées d'un miroir incorporé; les pertes résultant d'une telle disposition sont alors réduites en interposant un second miroir doté d'une ouverture centrale. Les nouvelles lampes à cycle d'iode sont montées dans l'axe d'un miroir elliptique enveloppant, recouvert d'un dépôt réflecteur interférentiel. Cette solution permet d'accroître le rendement lumineux de la lampe tout en réduisant l'émission du rayonnement infrarouge. L'échauffement doit en effet être évité sous peine de détérioration de la pellicule et de l'objectif. Pour ce faire, outre l'utilisation de miroirs condenseurs à couches interférentielles, on peut interposer dans le faisceau lumineux des filtres anticaloriques. Quelle que soit la formule choisie, il est toujours nécessaire d'évacuer l'énergie calorifique fournie par les sources à l'aide d'une importante circulation d'air.

**Les objectifs de projection,** pour l'agrandissement des images cinématographiques, renvoient sur un écran les rayons lumineux provenant du système optique condenseur. Leur constitution, quoique identique à celle des objectifs de prise de vue, vise à leur faire remplir certaines conditions particulières : lorsque le système condenseur est réalisé à l'aide d'un miroir, l'angle d'ouverture de l'objectif doit être supérieur à celui du miroir afin de bénéficier entièrement du faisceau lumineux provenant de ce dernier; l'objectif doit également pouvoir supporter l'échauffement provoqué par la concentration de lumière et présenter une profondeur de foyer suffisamment grande pour remédier aux défauts de planéité du film lors de son passage devant la fenêtre de projection. Avant l'avènement des écrans larges, les objectifs de projection étaient des « longs foyers » — 100 à 150 mm — de type Petzval, dont la partie arrière ne comportait pas de lentille collée. De nos jours, la qualité de la ventilation des projecteurs et l'utilisation de colles synthétiques autorisent ces collages : on utilise des anastigmats symétriques de grande ouverture relative — objectifs à courtes focales, qui n'offrent qu'une faible profondeur de foyer — ou des systèmes dérivés de doublets achromatiques (type symétrique) auxquels on associe un système afocal doubleur de champ. Il existe également des objectifs de projection à focale variable, formule qui s'est principalement développée dans le domaine du cinéma amateur.

**L'ensemble de lecture sonore** traduit les variations de densité photographique enregistrées le long des images en variations de courant électrique. Ces dernières sont ensuite amplifiées, puis transposées sous forme de vibrations sonores à l'aide de haut-parleurs. La tête de lecture du son se compose d'une source lumineuse, d'un système optique condenseur, d'une fente de lecture et d'une cellule photo-électrique. Son fonctionnement est fondé sur un phénomène photo-émetteur : le rayon lumineux émis par la lampe est concentré sur la fente de lecture qui se trouve par là même projetée sur la piste photographique; l'opacité variable de cette dernière effectue la modulation du rayon émergent qui vient frapper la cellule photo-électrique (une ampoule de verre, vide ou remplie de gaz inerte, dont une partie de la surface intérieure, polarisée négativement, est recouverte d'un dépôt de métal alcalin et d'un filament de tungstène de forme appropriée faisant office d'anode, l'ensemble étant soumis à une certaine différence de potentiel). Lorsque le rayon lumineux frappe la cathode, le métal émet des électrons qui, recueillis à la surface de l'anode, engendrent dans le circuit un courant photo-électrique proportionnel au flux lumineux incident.

La qualité de la lecture sonore dépend, d'une part, de la sensibilité et de la fiabilité de la cellule photo-électrique — caractéristiques que l'on a récemment pu améliorer par l'emploi de photo-diodes — et, d'autre part, de la largeur de la fente projetée. Or, pratiquement, cette dernière est au minimum d'environ 15 microns. La lecture des sons de fréquences aiguës (supérieures à 10 000 Hz), représentés par des ondulations extrêmement fines, est influencée par l'épaisseur du trait lumineux projeté par la fente, comme on le constate à l'écoute avec l'apparition d'une certaine distorsion et d'une baisse de niveau sonore (effet de fente).

La lecture du son sur piste couchée ou sur bande magnétique indépendante est effectuée à l'aide d'une tête de lecture magnétique dont le principe est identique à celui de la tête utilisée dans les magnétophones. Enfin, un appareil de projection ne saurait fonctionner sans un dispositif de refroidissement et de sécurité : les différents mécanismes et la lampe sont enfermés dans un carter métallique, et la protection du film contre l'échauffement est réalisée à l'aide d'un système de refroidissement par ventilation ou circulation d'eau. Les projecteurs 35 et 70 mm nécessitent également un dispositif de cadrage qui corrige le décalage éventuel des images par rapport à la fenêtre de projection.

## *La salle de projection*

Le poste de projection, les installations scéniques et les aménagements réservés aux spectateurs entrent dans les attributions de l'agencement technique des théâtres cinématographiques. Afin d'assurer la sécurité et le confort des spectateurs, un certain nombre de normes en régissent la disposition générale.

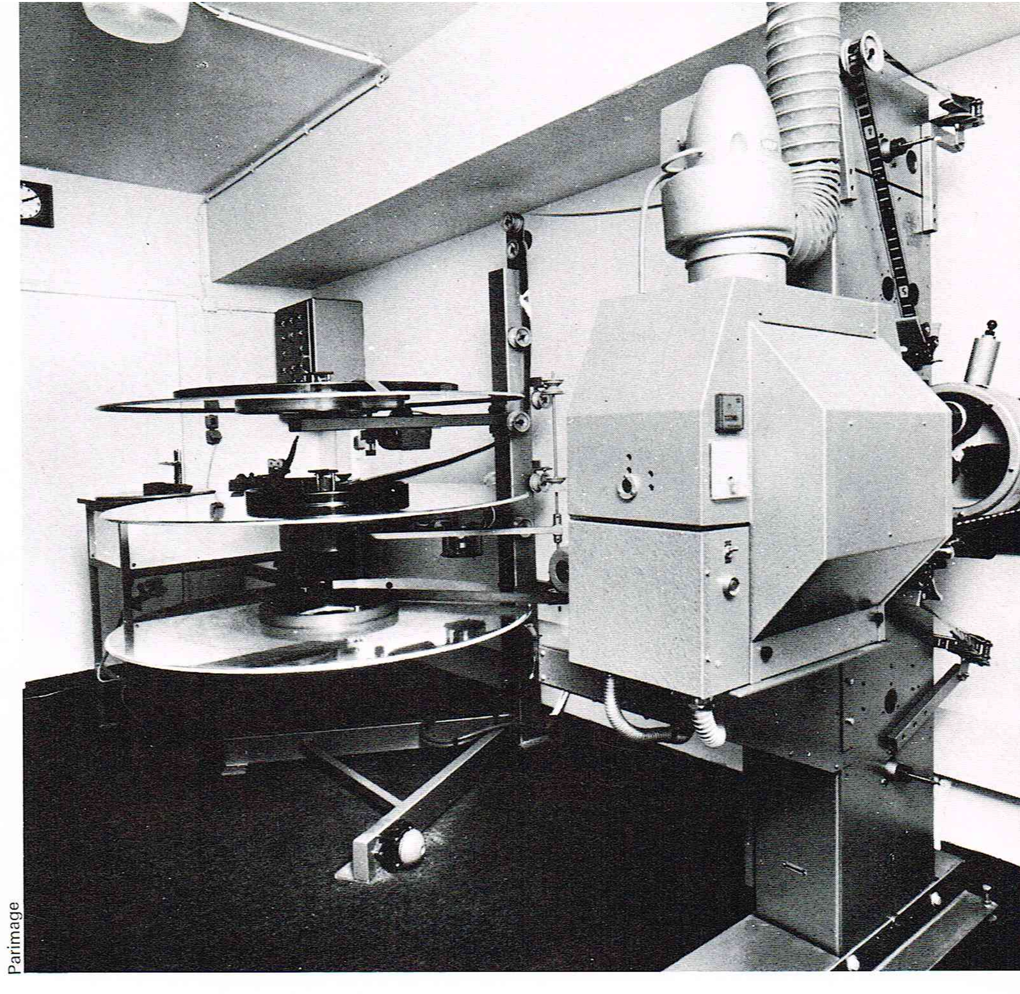
**Le poste de projection** doit être séparé de la salle et situé, dans le meilleur des cas, à la hauteur de l'écran. Il comprend deux appareils de projection fonctionnant en double poste; les deux bases de projection sont montées sur une dalle flottante afin d'éviter la transmission du bruit des mécanismes. L'insonorisation devant être totale, l'intérieur de la cabine est généralement recouvert de matériau absorbant, et des glaces doubles sont aménagées dans les ouvertures destinées au passage du faisceau lumineux. Le poste de projection comporte également les préamplificateurs et les amplificateurs destinés aux réglages sonores, ainsi qu'un aménagement particulier réservé à la mise en place des appareils de montage, de rebobinage et de vérification des films.

A l'époque du cinéma muet, **l'installation scénique** se présentait sous la forme d'une scène de théâtre à l'italienne au fond de laquelle était tendue une toile de coton et devant laquelle une fosse d'orchestre abritait les musiciens chargés d'assurer l'accompagnement sonore des images projetées. Cette disposition fut cependant rapidement abandonnée avec l'avènement du cinéma parlant : le café-concert laissa place à la salle de cinéma, et celle-ci, après maintes modifications architecturales, prit la forme que nous lui connaissons actuellement. L'installation scénique comporte désormais un écran de projection et un ensemble assurant la propagation correcte des ondes sonores.

Les dimensions de l'écran sont fonction de la grandeur de la salle et du type de projection adopté. Pour les projections panoramiques de type « grand écran », on lui confère une largeur sensiblement égale à la moitié de la longueur de la salle : disposition qui permet au spectateur de regarder l'image panoramique sous un angle horizontal d'environ 30°. Pour la projection de formats classiques (1,37 jusqu'à 1,65), la largeur de l'écran doit être réduite de moitié pour éviter de provoquer chez le spectateur une fatigue oculaire excessive. D'autre part, une projection de bonne qualité nécessite une luminance de l'écran parfaitement ajustée. (Nous rappelons que le facteur de luminance d'un écran — autrefois appelé brillance — est défini par le rapport des luminances que présentent dans l'axe de projection respectivement l'écran et un échantillon blanc étalon appliqué parallèlement à l'écran en son centre. La mesure des luminances s'effectue au moyen d'un photomètre visuel à comparaison, et l'unité de grandeur est établie en nit [candela par m²], en lambert $\left[\frac{10^4}{\pi} \text{ nit}\right]$ ou en blondel [$10^{-4}$ lambert]). La luminance ne doit pas, en effet, dépasser une certaine valeur critique au-delà de laquelle le phénomène de scintillement réapparaît, et doit, paradoxalement, être suffisamment importante pour assurer un rendu correct des contrastes : entre 100 et 150 blondels ces deux conditions se trouvent généralement réalisées.

Un écran de projection se caractérise également par la matière qui le constitue : on parle alors d'écran mat, réfléchissant ou gaufré. L'écran mat se présente de nos jours sous la forme d'un assemblage de feuilles de matière synthétique au facteur de réflexion de l'ordre de 80 %. En recouvrant ce support d'un enduit fortement réfléchissant, on obtient un nouveau type d'écran dont le facteur de réflexion peut atteindre des valeurs de 250 %. Dans ce cas, la lumière réfléchie étant très directionnelle, la luminance de l'image devient fonction de la direction d'observation. L'écran réfléchissant, composé d'une agglomération de sphérules de verre, est d'un emploi très répandu chez les amateurs. Ces derniers peuvent en effet assurer une luminance correcte de l'écran malgré la puissance réduite des lampes dont ils disposent; les spectateurs, généralement en nombre très limité, se placent de part et d'autre de l'axe de projection pour bénéficier de la luminance maximale de l'écran. Comme une telle disposition ne peut être adoptée dans les théâtres cinématographiques, il a fallu mettre au point des écrans réfléchissants à l'angle d'ouverture plus large : ainsi de l'écran nacré dont le support est recouvert d'un enduit polyvinylique dans lequel sont incrustées des paillettes cristallines à fort pouvoir de réflexion. La répartition de la lumière réfléchie peut encore être améliorée — particulièrement pour les projections panoramiques — en conférant à l'écran une certaine courbure. Enfin, un dernier type d'écran — remédiant à la directivité trop aiguë des écrans réfléchissants — est obtenu en réalisant le gaufrage d'un support aluminisé. Il semble actuellement que, grâce à une solution mixte du type « écran gaufré et perlé », on parvienne à obtenir une qualité accrue.

La propagation des ondes sonores s'opère à partir de haut-parleurs disposés à des points précis de la salle. Une partie d'entre eux, située derrière l'écran de projection, assure la restitution des paroles et des bruitages. Afin de favoriser la propagation correcte des ondes sonores, l'écran est percé d'une infinité de petits trous circulaires : d'où son nom d'écran transsonore. La restitution des sons d'ambiance est, pour sa part, réalisée à partir de haut-parleurs répartis sur les parois et le plafond


Parimage

▲ *La cabine de projection automatique du cinéma « Concorde ».*


B. Vincent - Parimage

▼ *La cabine de projection d'un cinéma d'Ontario Place au Canada. Le film projeté correspond à un nouveau format, trois fois supérieur à celui des films 70 mm.*




E. Lessing - Magnum

▲ ***Projection de cinéma en plein air lors d'une émission cinérama d'Europe 1.***

de la salle. Enfin, si les dimensions de cette dernière sont très importantes, on introduit un troisième ensemble de haut-parleurs faisant œuvre de relais sonore répétiteur. Le traitement acoustique du théâtre s'attache à une répartition uniforme des différents niveaux sonores tout en évitant l'apparition de phénomènes d'écho et de réverbération. Pour ce faire, les parois sont recouvertes de matériaux absorbants judicieusement disposés, et son architecture — objet de longues recherches sur maquette — favorise une bonne propagation acoustique.

**Les aménagements réservés aux spectateurs** doivent offrir des conditions correctes de confort, de vision et d'audition. Ces conditions sont régies par un certain nombre de normes et de dispositions générales qui, malheureusement, ne sont pas toujours respectées : soit que les salles, anciennes, se trouvent totalement inadaptées aux nouvelles normes d'implantation, soit que les exploitants sacrifient la qualité du spectacle au profit d'une rentabilité accrue. En France, les règles d'implantation sont définies par la norme S 27 001. Celle-ci impose le nombre, la disposition et la hauteur des fauteuils en fonction des dimensions de la salle et de l'écran; elle recommande un certain nombre de profils de théâtres favorisant des conditions de vision correctes quel que soit l'emplacement choisi par les spectateurs; enfin, elle stipule certaines règles destinées à assurer la sécurité des spectateurs, du personnel et du matériel.

## *Techniques diverses*

### *Prise de vues et projection d'images en relief*

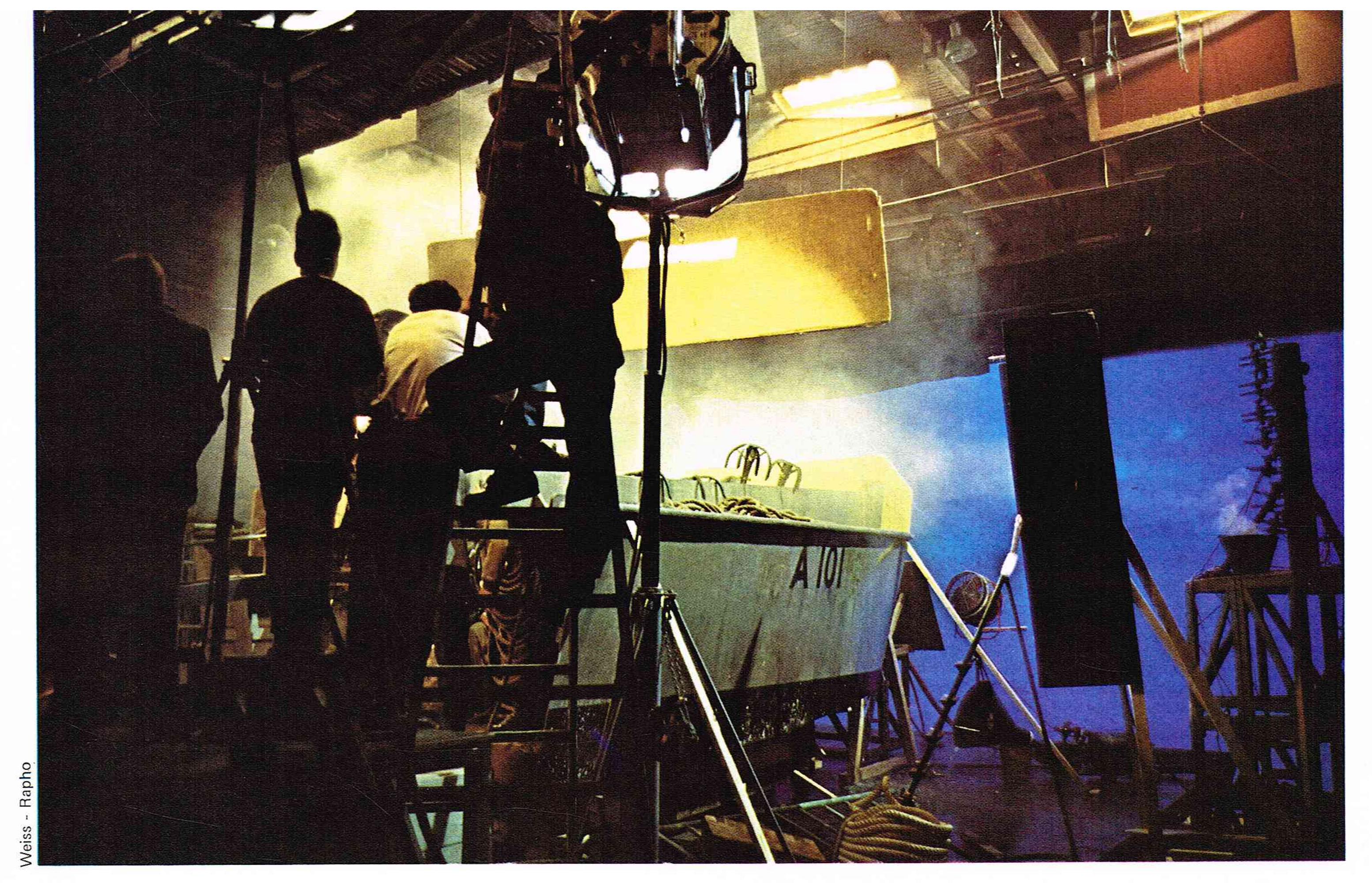
L'impression de relief est un phénomène physiologique différentiel : après avoir convergé sur un objet particulier, l'œil humain en transmet au cerveau une image qui est fonction de la distance et de l'angle de vision; la vision humaine étant binoculaire, le cerveau recevra donc d'un même objet deux images distinctes provenant des deux rétines. C'est cette parallaxe d'espace causée par la différence de point de vue de la vision binoculaire qui engendre l'impression de relief. Cette dernière est évidemment beaucoup plus accentuée si l'accommodation de la vision s'effectue sur des objets proches.

En cinéma, l'enregistrement et la restitution du relief posent un problème particulièrement aigu, et seul un nombre très limité de procédés a été commercialisé. Le plus important d'entre eux est indubitablement le procédé stéréoscopique : celui-ci consiste à enregistrer, dès la prise de vues, deux images correctement différenciées d'un même objet, puis, lors de la projection, à fournir au spectateur un dispositif de sélection lui permettant de séparer la vision des images droite et gauche par les yeux correspondants. L'enregistrement des couples d'images est généralement effectué sur un même film à l'aide d'une caméra munie de deux objectifs, et la différenciation des images gauche et droite s'effectue par filtrage des couleurs ou polarisation de la lumière.

La sélection chromatique, ou procédé des anaglyphes, consiste à imprimer sur un même film deux images en deux couleurs différentes. Pour cela, on munit les deux objectifs de filtres de couleurs composées dont l'un laisse passer les radiations extrêmes bleues et rouges, et l'autre les radiations intermédiaires vertes et jaunes. Les spectateurs disposent de lunettes munies d'écrans-filtres correspondants qui leur permettent d'observer les images projetées avec une relative sensation de relief. Ce procédé n'est pas apte cependant à la projection et à l'observation d'images en couleurs.

Dans le cas du procédé à lumière polarisée, la différenciation des couples d'images est obtenue en interposant un filtre polarisant devant chaque objectif de projection et en dotant les spectateurs de lunettes munies d'écrans polarisants similaires. L'enregistrement des images gauche et droite, dans ce cas, s'opère sur deux films distincts, et la projection de ces films sur deux projecteurs défilant en parfait synchronisme. Il existe également un autre procédé stéréoscopique utilisant la méthode de sélection individuelle : chaque spectateur est pourvu d'un sélecteur rotatif à fenêtre où apparaissent successivement les deux images différenciées, projetées sur un écran à raison de 48 images par seconde.

Outre ces différents dispositifs impliquant le port de lunettes ou l'emploi d'un appareil individuel, on rencontre des procédés stéréoscopiques à sélecteur collectif. Chaque salle de projection est munie d'un sélecteur unique qui se présente sous la forme d'une trame disposée devant l'écran; cette trame réalise la différenciation des couples d'images en les séparant en une infinité d'éléments appartenant successivement à l'image de droite et à l'image de gauche. Cette solution, *a priori* fort intéressante, oblige toutefois les spectateurs à être situés dans l'axe de projection et à conserver leur tête constamment immobile. A l'heure actuelle, des résultats bien meilleurs


Weiss - Rapho

▲ ***Réalisation de trucages avec des maquettes lors du tournage du film « Le jour le plus long ».***

sont obtenus expérimentalement en mettant en œuvre des dispositifs à trame mobile ou à trame dioptrique. Enfin, les progrès accomplis en matière de projection par laser permettront dans les prochaines décennies, pense-t-on, de réaliser des projections dans l'espace sans l'intermédiaire d'un écran-support et d'un système optique.

## Trucages et effets spéciaux

Le cinéma ne donne qu'une image déformée, et parfois même totalement illusoire, de la réalité : certaines formes de cinéma (reportage, documentaire, « cinéma-vérité ») limitent cette illusion à l'enregistrement et restituent les images et les sons réels — restitution qui reste évidemment purement subjective puisque conditionnée par les choix de l'auteur et « l'œil » de la caméra — tandis que d'autres (cinéma de fiction, film publicitaire) s'accréditent elles-mêmes en amplifiant la déformation spatio-temporelle de la réalité. C'est dans cette seconde forme de cinéma, généralement, que sont utilisés les trucages et les effets spéciaux. Ceux-ci ont deux fins particulières : créer l'impression de réalité (transparence, simplifilm, maquette, etc.), ou engendrer un univers de signes et de formes totalement imaginaire (effet de fondu, inversion, film-cache, etc.). La réalisation de ce qu'il est convenu d'appeler des « trucs » est effectuée indistinctement durant la prise de vue ou en laboratoire ; toutefois, les professionnels donnent leur préférence à la seconde solution qui, tout en leur laissant une plus grande liberté lors du tournage, offre des possibilités d'utilisation beaucoup plus nombreuses. Mais, pour certains trucages, permettant la reconstitution artificielle d'un décor, la première solution devient une obligation.

### Les effets spéciaux en laboratoire

La plupart d'entre eux sont réalisés à l'aide d'une tireuse optique particulière appelée *Truca*. Elle se compose d'un appareil de prise de vues, muni d'un objectif zoom couplé à un projecteur à vitesse variable où défilent deux films superposés. La *Truca* est un appareil extrêmement perfectionné dont les différents éléments, en commande électrique, concourent à des effets de travelling et de décadrement, auxquels s'ajoutent des effets spéciaux classiques comme la surimpression, le ralenti, l'accéléré, l'inversion, les différents effets de fondus et de volets et des trucages plus élaborés comme le travelling optique et le film-cache. La surimpression est obtenue en faisant défiler deux films positifs dans le projecteur de la *Truca*. Le ralenti, par opposition à l'accéléré, est réalisé lorsque le film se déplace plus vite dans la caméra que dans l'appareil de projection ; toutefois, afin de conserver le synchronisme d'obturation entre les deux appareils, il est nécessaire de maintenir les deux vitesses de défilement dans des rapports entiers : 48 images par seconde : 24 images par seconde par exemple. Le phénomène d'inversion s'obtient très facilement en faisant défiler le film en sens contraire dans la caméra.

Les ouvertures et les fermetures « au noir », obtenues à la prise de vues par variation du diaphragme ou de l'obturateur, sont réalisées dans la *Truca* en faisant varier la luminosité de la lampe du projecteur. Les fondus enchaînés s'obtiennent en effectuant une fermeture au noir du premier film positif, puis, après avoir remonté le film négatif d'une longueur correspondante, en opérant une ouverture au noir du second film positif. On réalise, enfin, les effets de volets en associant au film positif un film matrice sur lequel est impressionnée en noir la configuration de l'effet désiré, et les effets de grandissement et de décadrement en faisant varier la focale de l'objectif ou en avançant la caméra d'une certaine distance.

Dans leur version la plus simple, les trucages utilisant le cache-contre-cache ne font pas nécessairement appel à la *Truca*. On peut ainsi, lors de la prise de vues, faire évoluer différemment dans un même décor un personnage et son double en cachant alternativement les deux moitiés de l'image : une première prise de vues est réalisée en cachant, par exemple, la partie droite du cadre et en faisant évoluer le personnage dans la partie gauche ; puis, après avoir entièrement remonté le film dans le magasin débiteur, une seconde prise de vues est effectuée dans des conditions inverses. La réalisation d'un tel trucage demande, pour être parfaite, une fixité rigoureuse de la caméra, un cadrage identique du décor dans les deux prises de vues et l'emploi d'un cache flou pour éviter l'apparition d'une ligne de séparation dans la partie centrale de l'image. Les différents effets spéciaux que nous venons de passer en revue ne sont pas l'apanage des seuls professionnels : les constructeurs ont en effet, depuis plusieurs années, mis à la disposition des amateurs des caméras de format réduit dont les nombreux accessoires autorisent de telles réalisations.

Il n'en est pas de même du procédé film-cache qui nécessite impérativement des travaux de laboratoire. Le film-cache a servi de base à l'élaboration de nombreux trucages parmi lesquels les plus célèbres sont certaine-




M.C. Hugh - Sygma

▲ ***Scène de tournage du film « King Kong »; la taille du personnage nécessitait la mise en place de systèmes surélevés de prises de vues.***

ment « l'Homme invisible » et l'ouverture de la mer Rouge dans le film de Cecil B. de Mille, *les Dix Commandements*. Prenons par exemple le cas de l'Homme invisible qui se déplace tout habillé dans une pièce, mais évidemment sans tête ni mains. La prise de vues est effectuée en deux étapes successives : une première qui consiste à filmer le décor seul, et une seconde lors de laquelle sont enregistrés, sur un autre film, les déplacements sur fond noir d'un personnage habillé dont la tête et les mains ont été au préalable recouvertes d'un tissu noir. Le négatif de ce second film représente des vêtements — aux couleurs complémentaires de celles de l'original — se déplaçant sur un fond transparent; on en tire un contretype positif, puis un second négatif très contrasté, sur lequel les vêtements seront rendus par un noir opaque : c'est le second négatif qui servira de film-cache. L'opération principale consiste alors à tirer un positif à partir de la superposition du négatif du décor et du film-cache : l'image résultante représente le décor sur lequel se déplacent en silhouette les vêtements transparents. Cette opération terminée, on procède au tirage final du film positif résultant de la superposition du négatif du décor évidé et du négatif original des vêtements. Il est évident que ce type de trucage, particulièrement complexe, exige pour être parfaitement réussi la prise en compte d'un certain nombre de précautions pendant la prise de vues et lors des différentes opérations de laboratoire (éclairage particulier du tissu noir, choix de la couleur des vêtements, déplacements précis du personnage, etc.). Il est étonnant de constater que tous ces trucages avaient été découverts et utilisés par Georges Méliès dès le début de ce siècle et bien avant que l'on ne parlât de langage cinématographique !

### *Effets spéciaux obtenus lors de la prise de vues*

Par définition, les **maquettes** sont des reproductions à échelle réduite d'appareils et de constructions architecturales dont l'aspect et les dimensions sont parfaitement respectés. En cinéma, il est également nécessaire de les construire à l'aide de matériaux convenablement adaptés qui ne risquent pas de dévoiler la « supercherie » au public. Lorsque la prise de vues d'une maquette exige des mouvements de caméra, il est nécessaire de leur conférer une vitesse proportionnelle à l'échelle de la maquette : cette réduction de vitesse s'accompagne, dans le cas du panoramique, d'un déplacement de l'axe de rotation de la caméra, laquelle doit alors être située au centre optique de l'objectif. Le rapport dimensions/vitesse doit également être conservé lorsque c'est la maquette elle-même qui se déplace : cette opération est généralement facilitée en accélérant la cadence de prise de vues et en choisissant convenablement les angles de caméra.

Outre leur fonction de décors réels réduits, les maquettes servent aussi de complément à la réalisation de grandes constructions architecturales (procédé Schufftan). Ce trucage, connu également sous le nom de maquette de perspective, consiste à interposer devant la caméra un élément de décor miniature qui se raccorde en perspective à la base du décor réel. Il est fréquemment utilisé en studio lorsqu'on désire filmer les parois et le plafond d'une salle où évoluent des personnages. Si, en effet, on construit la salle dans son entier, le directeur de la photographie ne pourra plus utiliser les projecteurs de passerelles et limitera de ce fait la qualité de son éclairage. Partant, on construit seulement les parois de la salle, et le décorateur fait réaliser un plafond miniature que l'on place en premier plan, tout près de la caméra. Pour que l'illusion soit complète, il convient de raccorder très exactement le plafond avec le reste du décor (raccords de position et d'éclairage). Le procédé Schufftan, qui exige une mise au point très détaillée, implique nécessairement la prise de vues de plans fixes.

Le **simplifilm** est une forme dérivée du procédé Schufftan. On remplace l'élément du décor miniature par une photographie, généralement de plus petites dimensions, dans laquelle est pratiqué un évidement où sont prévus l'emplacement et l'évolution des acteurs. Dans le procédé Dufour, la photographie est inversée et suivie d'un verre de champ et d'un second objectif; l'objectif de la caméra est lui-même suivi d'un prisme de Wollaston avec « toit » permettant l'inversion totale des images. Pour que le trucage soit parfaitement réussi, il faut, en plus du raccord exact de la photographie et du décor, que ladite photographie ne soit pas trop contrastée et qu'elle présente un rendu de perspective identique à celui du champ réel.

La **transparence** consiste à projeter sur un écran les images d'un décor réel ou imaginaire : cette projection est effectuée par derrière l'écran, la caméra enregistrant simultanément les images projetées et les acteurs placés devant l'écran de transparence. Ses applications sont fort nombreuses, et chacun d'entre nous se souvient des scènes de « western » dans lesquelles le héros et le méchant bandit se livrent à une lutte sans merci sur le toit d'une diligence lancée à folle allure. *A priori*, rien de plus simple : on effectue une prise de vues en mouvement du paysage dont on projette le film sur l'écran de transparence; devant cet écran est disposée une diligence montée sur ressorts sur laquelle les deux acteurs jouent la scène tandis qu'un ventilateur de forte puissance accentue l'impression de réalité en faisant voler au vent leurs cheveux et leurs vêtements.

Pourtant, la réalisation d'un tel trucage est d'une extrême complexité, et il est rare qu'il passe inaperçu dans les séquences d'un film. On doit s'assurer en premier



Walt-Disney Productions



Walt-Disney Productions

▲ *Deux extraits de films d'animation réalisés par Walt Disney : à gauche, Mickey dans une scène de l'Apprenti Sorcier du film* Fantasia *; à droite, Peter Pan affrontant le capitaine Crochet dans le film* Peter Pan. *© Walt Disney Productions.*

lieu que la focale de l'objectif de la caméra est la même que celle de l'objectif qui a pris le film projeté. Ce dernier doit d'ailleurs être un positif très détaillé et légèrement surexposé; on emploie pour cela une émulsion spéciale « background ». Est également nécessaire une luminance uniforme de l'écran dont la zone centrale présente invariablement un halo lumineux : la réduction de ce point chaud est partiellement réalisée en mettant en œuvre dans l'appareil de projection une lampe à arc à haute intensité à laquelle on associe un système de condenseur-relais; une autre méthode, c'est l'utilisation d'un écran mat en matière plastique à absorption compensée. Il convient de signaler que, dans le cas de projections de petites dimensions, le point chaud peut être totalement éliminé si on incline l'appareil de projection par rapport à l'axe de la caméra. En dernier lieu, il faut assurer un système de synchronisation entre l'obturateur de la caméra et celui du projecteur qui, dans ce cas, ne comporte pas de pale de scintillement. Il est amusant de remarquer que si la caméra est munie d'un système de visée reflex sur obturateur, le cameraman ne verra aucune image sur l'écran durant toute la prise de vues, chaque obturation de la caméra s'accompagnant d'une obturation de l'appareil de projection.

Une version plus élaborée de la transparence est réalisée par le **procédé Transflex.** Il consiste à disposer l'appareil de projection du même côté que la caméra en l'orientant perpendiculairement à l'axe de cette dernière : le faisceau lumineux est renvoyé sur l'écran par une glace sans tain placée à l'intersection des axes des deux appareils.

La gamme des trucages utilisés en cinéma étant infiniment étendue, nous nous sommes efforcés, dans l'énumération précédente, de n'étudier que les plus significatifs. Nous complèterons cette liste en citant les trucages qui font appel aux déplacements de la caméra ou de l'objectif par rapport à la scène (tremblements de terre, tapis volant, déplacement de maquette...), ceux qui nécessitent l'emploi de filtres spéciaux (effets de brouillard et de brume, nuit américaine...) et enfin ceux qui sont indirectement liés aux techniques cinématographiques (pluie, neige, ouragan, balle de revolver fracassant une vitrine, hémoglobine...). Ces différents effets visuels s'accompagnent évidemment d'un nombre non moins important de trucages sonores.

### *Le cinéma d'animation*

Il vise à donner, par des dessins ou par des marionnettes, l'impression de mouvement, grâce à la photographie image par image. La technique du dessin animé consiste à filmer image par image une succession de dessins légèrement différenciés les uns des autres et à effectuer leur projection à la cadence habituelle des images cinématographiques. Les dessins sont réalisés sur des feuilles de Rhodoïd (normalisées à 180 × 240 mm), appelées *cels,* à base d'acétate de cellulose : le gouachage a lieu sur le verso des feuilles transparentes tandis que les traits sont exécutés sur le recto avec de l'encre de Chine. Chaque feuille de Rhodoïd standardisée possède des perforations qui facilitent son positionnement sur le plateau d'un banc-titre. Les effets de profondeur sont obtenus en disposant plusieurs cels sur des plaques de verre étagées d'une multiplane; le dernier cel, qui représente généralement le fond du décor, est entièrement gouaché et opaque. La caméra, munie d'un compteur métrique et d'un compteur d'images, est montée sur une colonne verticale à glissière au-dessus du plateau : les travellings verticaux (donc d'approche ou d'éloignement) sont réalisés en rapprochant ou en éloignant la caméra des dessins, et les travellings latéraux par déplacement régulier et constant — entre chaque prise de vues — d'un ou de plusieurs cels figurant le décor. La plupart des dessins sont exécutés à partir d'une bande sonore prédéterminée, et la synchronisation s'établit à

▼ *Tableau III : les investissements français dans la production de films longs métrages (d'après* l'Activité cinématographique française *en 1976 - Centre national de cinématographie).*

**Tableau III**
**Les investissements français dans la production de films longs métrages (en millions de francs)**

| Années | Films intégralement français | | Films de coproduction | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Francs courants | Francs constants | Francs courants | Francs constants | Francs courants | Francs constants |
| 1966 | 89,61 | 181,01 | 149,89 | 302,78 | 239,50 | 483,79 |
| 1967 | 65,85 | 131,04 | 137,44 | 273,51 | 203,29 | 404,55 |
| 1968 | 70,31 | 135,70 | 137,26 | 264,91 | 207,57 | 400,61 |
| 1969 | 112,07 | 201,73 | 162,50 | 292,50 | 274,57 | 494,23 |
| 1970 | 96,82 | 162,66 | 164,04 | 275,59 | 260,86 | 438,24 |
| 1971 | 99,56 | 160,29 | 148,41 | 239,94 | 247,97 | 399,23 |
| 1972 | 109,08 | 165,80 | 228,10 | 346,71 | 337,18 | 512,51 |
| 1973 | 154,90 | 215,31 | 241,93 | 336,28 | 396,83 | 551,59 |
| 1974 | 204,71 | 239,51 | 190,54 | 222,93 | 395,25 | 462,44 |
| 1975 | 329,37 | 362,31 | 186,10 | 204,71 | 515,17 | 566,69 |
| 1976 | 340,33 | 340,33 | 129,15 | 129,15 | 469,48 | 469,48 |

| Postes du devis | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 |
|---|---|---|---|---|
| Sujet | 11,24 | 7,49 | 7,62 | 7,27 |
| Techniciens | 12,02 | 21,45 | 22,06 | 22,69 |
| Interprétation | 19,75 | 18,10 | 17,22 | 17,65 |
| Studios | 3,83 | 1,89 | 1,70 | 1,56 |
| Pellicule-Laboratoires | 8,87 | 9,21 | 8,16 | 7,73 |
| Assurances et charges sociales | 10,30 | 10,80 | 10,58 | 11,13 |
| Extérieurs et fournitures | 19,80 | 16,18 | 16,45 | 16,70 |
| Divers | 14,19 | 14,88 | 16,21 | 15,27 |

**Tableau IV**
**L'importance des principaux postes du devis de 1973 à 1976 pour les films longs métrages (en pourcentages)**

partir du tempo musical; une noire égale 24 cels, une croche égale 12 cels, etc. La réalisation d'un dessin animé exige beaucoup de temps — une seconde de projection équivaut à 24 dessins sur Rhodoïd — et un talent imaginatif et artistique incontestable.

Le cinéma d'animation permet également d'articuler et de « donner vie » à des marionnettes ou à des sujets en cire dont on déplace minutieusement les divers éléments entre chaque ouverture de l'obturateur.

Il convient de signaler, d'autre part, le procédé de peinture sur film, mis au point par Norman Mac Laren, qui consiste à dessiner directement les images sur la pellicule cinématographique. Pour faciliter son travail de création, l'artiste dispose d'un système optique qui renvoie sur le film l'image précédemment dessinée.

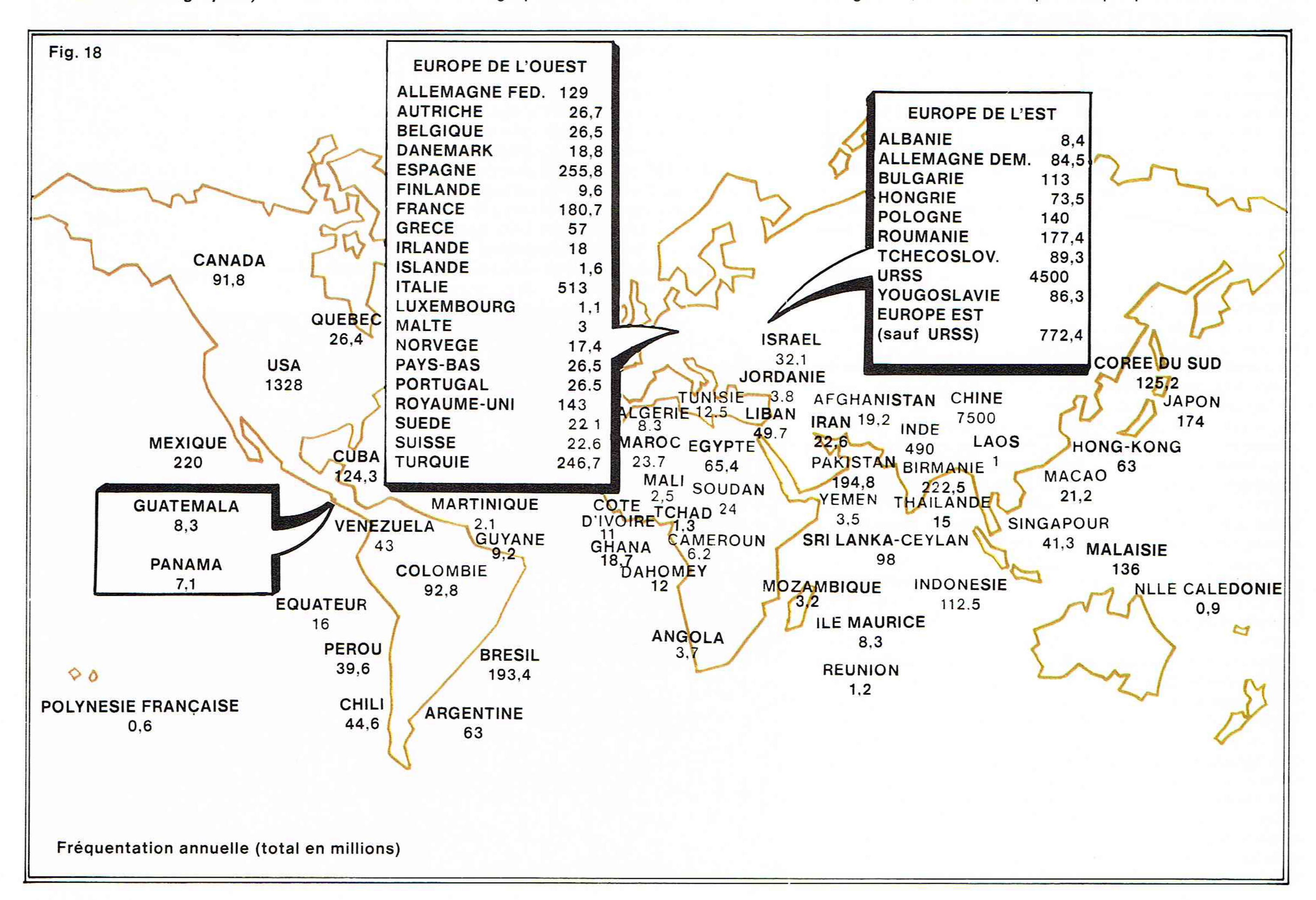
## Aspects généraux du cinéma commercial. Faits et chiffres

### La production

Contrairement aux « major companies » américaines et au cinéma d'état d'Union soviétique, la production cinématographique française se trouve soumise aux lois rudes de la concurrence. Aucun organisme, si ce n'est les commissions d'agrément et de soutien financier du C.N.C., n'est accrédité à contrôler et à organiser le financement de l'industrie cinématographique. Il en résulte une situation particulièrement instable et précaire dans laquelle chaque producteur s'emploie désespérément à regrouper les fonds nécessaires au financement du film qui a eu ses faveurs. En 1975, on comptait en France 486 sociétés de production de films long métrage et 990 sociétés de production de films court métrage (le capital minimal des sociétés de production de films long métrage est fixé à 300 000 F, mais à 100 000 F lorsque la société est dirigée par un réalisateur qui assure lui-même la mise en scène du film, selon les chiffres officiels publiés par le Centre national de la cinématographie pour l'année 1975; les chiffres cités par la suite proviennent de la même source).

Ces chiffres ne doivent cependant pas cacher la véritable situation de la production française; en effet, pour le long métrage, le nombre de sociétés de production actives (c'est-à-dire ayant effectivement participé à la production de films) s'est élevé à 185, soit 250 producteurs (« inactifs »). Lorsqu'on sait que, toujours pour l'année 1975, le nombre de films produits (films français et coproductions à majorité française) s'est élevé à 197 — ce qui correspond pour l'ensemble de la production à un investissement total de 515 millions de francs, et de plus de 700 millions en y intégrant les investissements étrangers —, on constate que chaque producteur actif ne

▼ *Figure 18 : la répartition de la fréquentation des cinémas dans le monde en 1975 (figure 18, ainsi que tableaux IV, V et VI, d'après l'Activité cinématographique française en 1976 - Centre national de cinématographie).*



produit en moyenne qu'un seul film par année (*tableau* III). Le coût moyen d'un film français se situe actuellement aux environs de 3 millions de francs : les sociétés de production, qui ne disposent généralement pas de cette somme, doivent faire appel à diverses formes de crédit pour réaliser le financement de leur film (crédits des fournisseurs, à-valoir des distributeurs, prêts bancaires garantis, soutien financier du C.N.C. et accords de coproduction). La part des investissements étrangers dans la production française est d'ailleurs très importante, puisqu'elle s'élève annuellement à environ 200 millions de francs et qu'elle concerne un quart des films produits.

Le *tableau* IV donne la répartition comparée des postes du devis de 1973 à 1976. Sur le plan de la coproduction bipartite, les pays avec lesquels la coproduction a été la plus active sont d'abord l'Italie, et ensuite l'Espagne et l'Allemagne fédérale.

### *La distribution et l'exploitation*

Le circuit de la distribution, intermédiaire entre la production et l'exploitation, est dans une situation beaucoup plus stable et homogène. Au 31 décembre 1974, sur un total de 193 entreprises titulaires de l'autorisation d'exercice de la profession, on dénombrait 133 sociétés de distribution de films long métrage pour lesquelles des résultats d'exploitation de films ont été enregistrés :

— 4 sociétés importantes possèdent des agences dans chaque région cinématographique (Paris, banlieue, grande région parisienne, Bordeaux, Lille, Lyon, Marseille, Strasbourg et Nancy).

— 67 sociétés exercent leur activité sur l'ensemble du territoire national sans avoir d'agence dans chaque zone cinématographique, dont 35 essentiellement dans le cadre des salles classées « Art et Essai ».

— 62 autres sociétés exercent une activité régionale ou multirégionale (dont 22 sur plusieurs secteurs cinématographiques).

Le nombre de films programmés en France est actuellement d'environ 4 470 (dont 1 420 sont français). Pendant l'année 1975, 4 328 salles d'exploitation standard (35 mm) ont accueilli 180 millions de spectateurs qui ont assuré une recette globale de 1 565 millions de francs. La part des exportations devient progressivement de plus en plus importante dans l'amortissement des films français : la Communauté européenne demeure le premier marché pour les films français (35,8 %) devançant dans l'ordre ceux d'Amérique du Nord (27,1 %), d'Asie-Océanie (8,8 %), d'Afrique (5,2 %, dont une majorité de pays francophones) et d'Amérique Latine (3,3 %), les 19,8 % restant étant représentés par des contrats de cession pour des ensembles de territoires qui ne correspondent pas à des zones géographiques définies. La répartition des recettes globales — étude comparative sur trois années — est illustrée par le schéma (statistique C.N.C. de juin 1976) : il convient de préciser que la part « production-distribution » (les actualités et T.V.A. affectant le film incluses) est de 643,43 millions de francs.

Nous achèverons cette brève incursion dans le domaine du cinéma commercial par un graphique récapitulatif, où est aussi exprimée la répartition de la fréquentation cinématographique mondiale (*fig.* 18), et par les *tableaux* V et VI qui donnent les résultats d'exploitation pour les années 1960-1975 et les films ayant enregistré les meilleurs résultats de fréquentation (1956-1975).

## BIBLIOGRAPHIE

BRARD P., *Technologie des caméras*, Éditions techniques européennes. - VIVIÉ J., *Projection des images animées*, Éditions Dujarric. - LO DUCA, *Technique du cinéma*, P.U.F. - ANDRÉANI R., *l'Objectif photographique*, Publications Photo. Rev. - *American Cinematographer Manual*, A.S.C. Publications. - *Primer for Film-Making*, Bobbs-Merril Company, inc. - *Animated Film. Concepts, Methods, Uses*, Interland Publishing inc. - *Bulletin de la Commission supérieure technique*. - *Bulletin d'information* du Centre national de la cinématographie. - *American cinematographer*. - Cours et publications de l'E.N.P.C. (Vaugirard).

**Tableau V**
**Nombre de spectateurs et volume des recettes dans les salles standards (en millions de spectateurs et en millions de francs)**

| Années | Spectateurs | Recettes | | Recette moyenne par spectateur |
|---|---|---|---|---|
| | | Francs courants | Francs constants | |
| 1966 | 234,7 | 785,150 | 1 586,003 | 3,34 |
| 1967 | 211,4 | 784,716 | 1 561,585 | 3,71 |
| 1968 | 203,2 | 783,829 | 1 512,790 | 3,86 |
| 1969 | 183,9 | 806,408 | 1 451,534 | 4,39 |
| 1970 | 184,4 | 882,075 | 1 481,886 | 4,78 |
| 1971 | 177,0 | 932,869 | 1 501,919 | 5,27 |
| 1972 | 184,4 | 1 078,202 | 1 638,867 | 5,85 |
| 1973 | 176,0 | 1 174,783 | 1 632,948 | 6,68 |
| 1974 | 179,4 | 1 359,182 | 1 590,243 | 7,58 |
| 1975 | 181,7 | 1 565,013 | 1 721,514 | 8,66 |
| 1976 (partielle) | 176,0 | 1 744,578 | 1 744,578 | 9,91 |

**Tableau VI**
**Les films ayant enregistré les meilleurs résultats de fréquentation sur le marché cinématographique français (1er janvier 1956 - 31 décembre 1975)**

| Titre du film | Nationalité | Spectateurs (en millions) |
|---|---|---|
| La grande vadrouille | Française | 17,179 |
| Le pont de la rivière Kwaï | Britannique | 12,964 |
| Les dix commandements | Américaine | 11,935 |
| Le jour le plus long | Américaine | 11,750 |
| Il était une fois dans l'Ouest | Italienne | 11,604 |
| Le corniaud | Française | 11,580 |
| Ben Hur | Américaine | 11,381 |
| Les canons de Navarone | Américaine | 10,044 |
| Les Misérables | Française | 9,935 |
| La vache et le prisonnier | Française | 8,842 |
| Docteur Jivago | Américaine | 8,607 |
| La grande évasion | Américaine | 8,603 |
| La guerre des boutons | Française | 8,201 |
| Le gendarme de Saint-Tropez | Française | 7,759 |
| Les bidasses en folie | Française | 7,129 |
| Les aventures de Rabbi Jacob | Française | 6,972 |
| West Side Story | Américaine | 6,950 |
| Michel Strogoff | Française | 6,867 |
| Les sept mercenaires | Américaine | 6,861 |
| Le gendarme se marie | Française | 6,643 |
| Sissi | Autrichienne | 6,593 |
| Emmanuelle | Française | 6,588 |
| Les grandes vacances | Française | 6,520 |
| Sissi jeune impératrice | Autrichienne | 6,392 |
| La cuisine au beurre | Française | 6,375 |
| Les aristochats | Américaine | 6,279 |
| Goldfinger | Britannique | 6,149 |
| Le livre de la jungle | Américaine | 6,017 |
| Mourir d'aimer | Française | 5,913 |
| Guerre et Paix | Américaine | 5,856 |
| Le bossu | Française | 5,819 |
| Oscar | Française | 5,804 |
| Sissi face à son destin | Autrichienne | 5,777 |
| Les dents de la mer | Américaine | 5,690 |
| Notre-Dame de Paris | Française | 5,675 |
| La vérité | Française | 5,655 |
| Les 101 dalmatiens | Américaine | 5,547 |
| Le petit baigneur | Française | 5,536 |
| Le cerveau | Française | 5,485 |
| Le gendarme à New York | Française | 5,474 |
| Les fous du stade | Française | 5,468 |
| La folie des grandeurs | Française | 5,434 |
| Quand passent les cigognes | Soviétique | 5,381 |
| La jument verte | Française | 5,256 |
| Lawrence d'Arabie | Britannique | 5,222 |
| Bons baisers de Russie | Britannique | 5,160 |
| Le bon, la brute et le truand | Italienne | 5,114 |
| Opération tonnerre | Britannique | 5,001 |

# L'INDUSTRIE PAPETIÈRE : LA FABRICATION DU PAPIER

## De Gutenberg à Xérox

L'homme vit dans une civilisation du papier, qui reste le support essentiel de la transmission de l'information écrite.

Depuis bientôt deux mille ans que l'on sait fabriquer du papier, les techniques ont beaucoup évolué. Le papier est d'abord obtenu à partir du bambou, en Chine, vers le IIe siècle; les Européens développent, à partir du XIIe siècle, un procédé utilisant les chiffons de lin et de chanvre. Ce n'est que vers 1850, avec l'apparition de l'énergie thermique et de la chimie industrielle, que l'on commence à fabriquer le papier à partir du bois, qui constitue maintenant la matière première de 95 % des papiers et cartons.

Quel est donc le constituant du papier, qui se retrouve dans le bambou, le chiffon de lin, le bois ? Il s'agit de la cellulose. C'est une macromolécule linéaire, constituée par une chaîne de motifs à structure hexagonale, l'hexose, de formule $C_6H_{12}O_6$. Ce sucre est synthétisé par les plantes à partir du gaz carbonique de l'air et de l'eau, à travers un mécanisme complexe, la photosynthèse, où la chlorophylle joue un rôle essentiel. Une macromolécule de cellulose comporte en moyenne entre 1 500 et 4 000 motifs, et elle peut être considérée comme très stable chimiquement. Ces chaînes sont associées en paquets, les fibrilles, qui sont agglomérées en fibres. Ces fibres ont une longueur variant avec l'espèce de bois : les résineux fournissent des fibres d'environ 3,5 mm de long, tandis que celles des feuillus ne mesurent en moyenne que 1 mm.

Ces fibres, qui constituent la pâte à papier, sont ensuite disposées de manière à faire une feuille de papier dont la qualité, la couleur, l'épaisseur peuvent varier dans de larges proportions.

Après avoir décrit rapidement la constitution du bois, il y aura lieu de présenter les techniques d'obtention de la pâte, puis la fabrication de la feuille. En effet, ces deux étapes sont très distinctes, comme le montre le schéma d'ensemble (*fig.* 1).

▶ *Page ci-contre, figure 1 : tableau synoptique de la fabrication du papier.*

## Le bois

La cellulose est le constituant le plus important du bois; cependant ce dernier contient également des hémicelluloses, molécules chimiquement voisines de la cellulose, mais beaucoup moins stables chimiquement, de la lignine, un polymère contenant des noyaux aromatiques ainsi que — en très faible quantité — des composés organiques plus légers et des sels minéraux. Un bois sec contient en moyenne entre 25 et 30 % de lignine, entre 40 et 50 % de cellulose, tandis que les hémicelluloses représentent environ 20 % et les sels minéraux 0,5 %; le reste est constitué par les composés solubles comme les résines, les tanins.

### La cellulose

On sait déjà que c'est une macromolécule très stable chimiquement, puisqu'elle résiste très bien aux traitements acides et alcalins, même dans des conditions difficiles de température et de concentration. Évidemment, les groupements terminaux qui se trouvent en bout de chaîne sont plus sensibles aux réactions de dégradation, d'addition ou de substitution.

### Les hémicelluloses

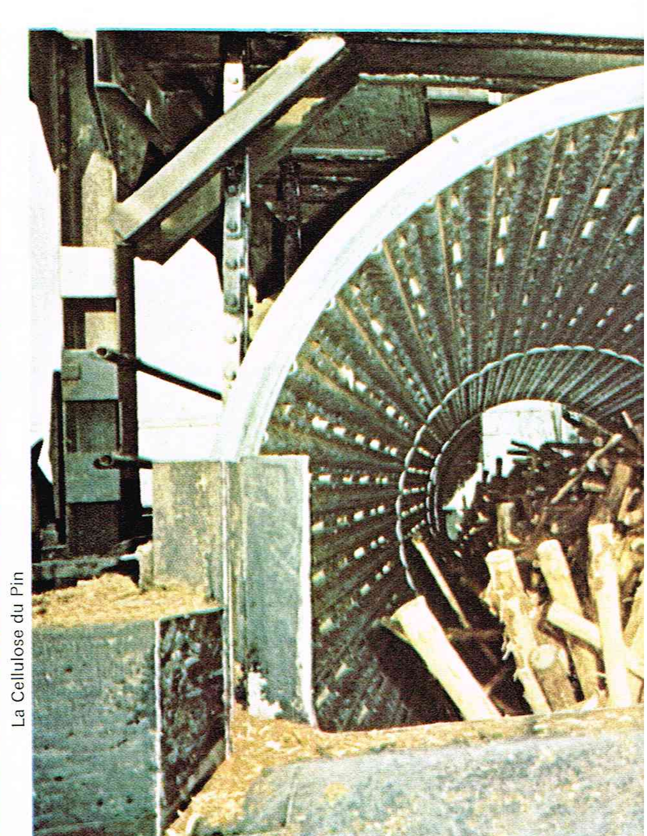
Ce sont des hydrates de carbone voisins de la cellulose, mais qui sont beaucoup plus réactifs. Une macromolécule d'hémicellulose ne contient souvent qu'une centaine de motifs de base (glucose, mannose, xylose), si bien qu'elle subit facilement des réactions de dégradation et ne résiste pas aux traitements chimiques.

### La lignine

La lignine est un composé de masse molaire mal définie, qui contient des noyaux benzéniques. La chimie de la lignine a été largement étudiée. Il est nécessaire, pour obtenir à partir du bois une pâte à papier blanchie de qualité, de détruire la lignine par voie chimique. En effet, la lignine constitue en quelque sorte le squelette du bois, c'est elle qui relie entre elles les fibres de cellulose et donne ainsi au bois sa dureté et sa rigidité. Heureusement, la lignine est sensible aux traitements acides ou basiques. Par exemple, elle réagit avec les ions sulfite et bisulfite, pour donner des lignosulfonates solubles. Elle est hydrolysée par les solutions alcalines et se révèle sensible aux mercaptans.

Toutes ces réactions, qui détruisent la lignine, sont à la base des procédés chimiques de délignification.

Archivio I.G.D.A.



La Cellulose du Pin

▶ *A gauche, une estampe représentant la fabrication du papier dans la Chine antique. Au milieu, l'intérieur d'un écorceur à tambour; le tambour est animé d'un mouvement de rotation et l'écorçage est réalisé par le frottement des rondins les uns contre les autres. A droite, après l'écorçage, les troncs d'arbres sont coupés à la dimension adéquate avant d'être broyés ou réduits en copeaux. (Papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie.)*

### Les autres composés

Citons les terpènes, que l'on retrouve dans l'essence de térébenthine, les résines, qui contiennent des acides gras, les tanins, dont la structure n'est pas encore parfaitement élucidée.

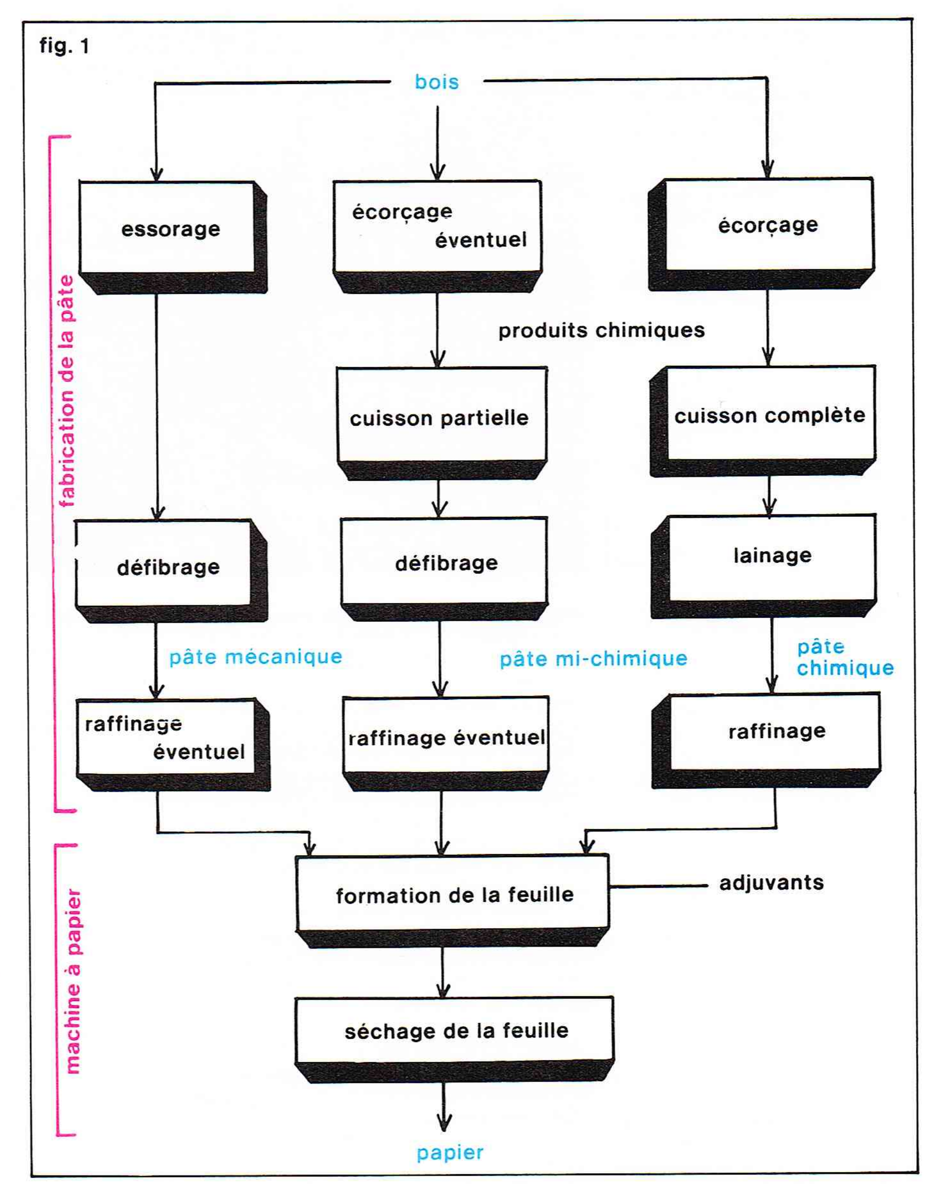
## *La fabrication de la pâte à papier*

Il est nécessaire de libérer les fibres du bois, afin d'obtenir la pâte à papier. La qualité de la pâte obtenue peut varier dans de larges proportions. Si elle n'est constituée que de cellulose, après une délignification complète, c'est une pâte blanchie de grande qualité. Si, au contraire, elle est obtenue par un simple traitement mécanique, elle contient encore de la lignine; elle a une couleur bistre et le rendement en pâte atteint 95 % en poids par rapport au bois initial. Il y a donc deux grandes catégories de pâte : les pâtes mécaniques et les pâtes chimiques, suivant que le procédé de fabrication repose sur un traitement mécanique ou chimique.

### *La fabrication des pâtes mécaniques*

On a su fabriquer de la pâte mécanique dès 1800, mais ce n'est que vers 1840 que le procédé commença à se développer. Aujourd'hui, comme à l'origine, la fabrication consiste à râper ou broyer le bois, dans d'énormes « moulins », dont l'organe principal est une meule, en pierre à l'origine, maintenant dans un matériau comme le carborundum. Afin d'éviter un échauffement trop grand et pour rendre le bois plus tendre, l'opération a toujours lieu en présence d'eau. Généralement, les rondins sont maintenus contre la meule, soit par des chaînes, soit par des dispositifs hydrauliques. L'énergie consommée dans une telle opération est très grande : entre 1 000 et 13 000 kWh par tonne de pâte. On conçoit pourquoi, en France, cette industrie s'est d'abord développée dans les régions riches en ressources énergétiques comme la houille blanche. Une part importante de l'énergie consommée, 80 % environ, est dégradée en énergie calorifique, si bien que la température dans la zone de défibrage peut approcher 100 °C. Le refroidissement est réalisé par de l'eau froide, et, à la sortie, la pâte se trouve en suspension dans l'eau, sa consistance variant de 1,5 % à 4 % (la consistance est égale, par définition, à la masse de pâte sèche contenue dans 100 g de suspension).

Il est aussi possible de fabriquer de la pâte, non pas à partir de rondins de bois, mais à partir de copeaux. Les copeaux de bois, dont les dimensions moyennes sont 2 à 3 cm pour la longueur, 4 à 5 mm pour l'épaisseur, sont broyés dans des défibreurs à disques, et ce, soit en

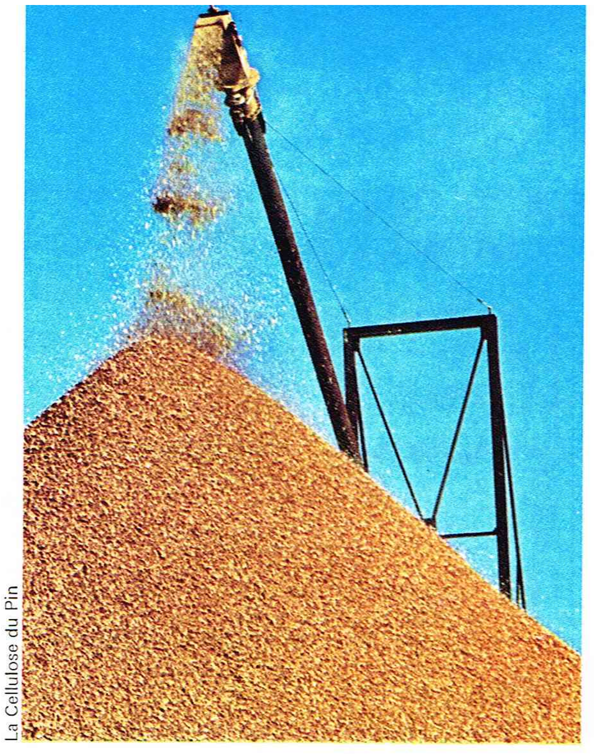







I.G.D.A. - Rizzi

▶ *A gauche, le stockage des copeaux de bois, matière première pour la fabrication de la pâte à papier, à la papeterie de Condat (Cantal). A droite, un lessiveur Kamyr de la papeterie de Facture (Gironde).*



La Cellulose du Pin

La Cellulose du Pin

présence d'eau, soit en présence de vapeur saturée, à une pression qui permette une température de broyage d'environ 180 °C. La pâte obtenue dans ces conditions est dite pâte thermomécanique. La quantité d'énergie consommée dans les défibreurs de ce type est tout à fait comparable à celle nécessaire aux broyeurs à meule.

La suspension est ensuite filtrée : la pâte est récupérée, et l'eau est recyclée. Cette pâte peut être séchée et stockée, ou utilisée telle quelle, ou encore blanchie. Notons qu'on peut faciliter la fabrication de la pâte mécanique en faisant subir au bois un traitement préalable, qui a pour but de diminuer l'énergie nécessaire à la séparation des fibres : imprégnation d'eau chaude, de liqueur alcaline ou d'une solution acide à base de monosulfite. Le rendement global de la fabrication de ces pâtes mi-chimiques varie entre 80 et 90 %, car une partie des hémicelluloses est détruite tandis que la lignine est conservée en totalité.

La pâte mécanique n'est pas une pâte de grande qualité : elle est jaunâtre, ou écrue, résiste mal au vieillissement. Elle est le constituant essentiel du papier journal — entre 80 et 100 % —; elle est souvent utilisée en mélange avec des pâtes chimiques dont la fabrication est beaucoup plus complexe.

### *La fabrication des pâtes chimiques*

La délignification complète par voie chimique peut être réalisée par plusieurs techniques; les principales sont le procédé au sulfite et le procédé kraft.

▼ *Un baquet de pâte à papier mécanique au moulin Richard-de-Bas à Ambert (Puy-de-Dôme).*



La Cellulose du Pin

#### Le procédé au sulfite

Les éléments principaux de ce procédé sont connus depuis 1880 environ. Il s'est développé rapidement, car il donnait une pâte très facile à blanchir. Il a été concurrencé à partir de 1930 par le procédé kraft, lorsque l'industrie a été capable de fabriquer des pâtes blanchies par ce procédé. L'un des inconvénients majeurs des procédés au sulfite est d'engendrer une pollution importante, à quoi s'ajoute une régénération difficile, parfois impossible, des produits chimiques.

Le principe de la cuisson au sulfite est simple : les copeaux sont entassés dans un réacteur, ou lessiveur. On y ajoute une liqueur riche en sulfite, et en augmentant la température, le composé actif, l'anhydride sulfureux $SO_2$, est libéré et attaque la lignine. Il se forme des composés complexes, des lignosulfonates, qui sont solubles. La pâte est ensuite lavée, blanchie ou non. Les liqueurs de cuisson sont concentrées et brûlées, fournissant une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

La liqueur acide est une solution de monosulfite dans l'eau contenant, à l'état dissous, un excès de $SO_2$. Elle est préparée le plus souvent sur place, par réaction du gaz $SO_2$ sur un carbonate alcalin, de calcium — la chaux $CaCO_3$ —, de magnésium, d'ammonium ou de sodium. La composition exacte de la liqueur est complexe, car il s'établit des équilibres chimiques, et les concentrations varient avec la température. En moyenne, la liqueur initiale contient 6 % en poids de $SO_2$ total, c'est-à-dire combiné ou libre.

Au cours de la cuisson, il convient de distinguer plusieurs phases. Tout d'abord l'imprégnation : les produits chimiques pénètrent dans les copeaux par capillarité. Cette phase est assez rapide. Ensuite, la lignine subit des réactions de sulfonation, puis se dissout en même temps qu'une partie des carbohydrates, qui sont dégradés, tant au sein de la pâte que dans la solution. Pour obtenir une délignification poussée, c'est-à-dire une teneur finale en lignine de 5 % par rapport au bois sec initial — rappelons que cette teneur initiale est de 25 % environ —, les opérations durent une dizaine d'heures. La température atteint 140 °C, et la pression est maintenue tout au long de la cuisson aux environs de 6 bars. Évidemment, les conditions opératoires sont beaucoup moins dures si le traitement chimique est suivi d'un défibrage mécanique, en vue de l'obtention d'une pâte mi-chimique qui peut être utilisée immédiatement pour la fabrication du papier pour carton ondulé. Les copeaux de bois, des feuillus divers à l'exception du châtaignier, sont cuits en 25 minutes dans un lessiveur en continu. Le rendement en pâte, à 90 % de siccité, est alors de 80 % par rapport au bois sec.

La cuisson fournit donc deux produits : la pâte brute et la liqueur de cuisson.

La qualité de la pâte dépend en tout premier lieu des essences de bois, puis des conditions de traitement. Les meilleures pâtes sont obtenues à partir des résineux, et

parmi les feuillus, c'est le bouleau qui arrive en tête quant à la qualité des fibres. La longueur de rupture d'une pâte de bouleau atteint 60 à 85 % de celle d'une pâte de pin ou de sapin. Le traitement de la pâte en vue d'obtenir un papier d'une qualité déterminée sera décrit dans un chapitre ultérieur. Quant à la liqueur de cuisson, c'est un liquide noir, polluant, contenant 11 à 17 % de matières sèches. Afin de la rendre combustible — elle contient des matières organiques —, il est nécessaire de la concentrer. Cette opération de concentration est réalisée dans des évaporateurs à multiples effets. Par chauffage, à une pression donnée, la liqueur bout, et l'eau est éliminée sous forme de vapeur. En évaporant sous différentes pressions — d'où le nom de multiple effet —, la concentration de la liqueur atteint environ 50 %. Avec une telle teneur, la liqueur est combustible : elle est brûlée dans des chaudières, ce qui donne de la vapeur. Mais les produits chimiques sont coûteux, et un effort a été fait pour régénérer les produits afin de minimiser les coûts et la pollution.

Le cycle de régénération varie évidemment suivant le procédé. S'il repose sur l'utilisation du sulfite de calcium, aucune possibilité de régénération n'existe. Au contraire, avec le sulfite de sodium ou de magnésium, la technique de récupération est fonctionnelle. Dans le cas du magnésium, la combustion de la liqueur fournit de l'anhydride sulfureux $SO_2$, et de l'oxyde de magnésium MgO. La réaction entre ces deux composés redonne du sulfite de magnésium qui est l'élément principal de la liqueur blanche de cuisson.

Les différentes eaux de lavage de la pâte sont une source de pollution importante : elles contiennent des composés chimiques et biologiques demandeurs d'oxygène. Si on rejette ces liqueurs dans une rivière, il se produit des réactions chimiques et biologiques qui consomment l'oxygène dissous, ce qui entraîne dans le milieu la disparition de la vie par asphyxie. Aussi, le traitement des eaux polluées représente-t-il depuis quelques années une préoccupation essentielle de l'industrie papetière.

Les eaux polluées séjournent d'abord dans un décanteur, où les matières en suspension décantent, sont filtrées et donnent des boues dont l'utilisation est très diverse. Ensuite, les eaux séjournent dans les lagunes, où l'eau est agitée et aérée par l'intermédiaire d'aérateurs qui insufflent dans l'eau de l'air, et donc de l'oxygène. Cette technique d'épuration est communément désignée par l'expression « lagunage aéré ». L'eau séjourne environ un mois en lagune, et n'est rejetée en rivière que lorsque sa demande chimique en oxygène (D.C.O.) et sa demande biologique en oxygène (D.B.O.) sont compatibles avec l'équilibre écologique des eaux naturelles. Notons que les notions de D.C.O. et de D.B.O. sont très bien définies et que leurs valeurs avant rejet sont fixées, en France, par le ministère de la Qualité de la vie.

### Le procédé kraft

Le procédé de délignification chimique le plus répandu dans le monde est le procédé kraft. Ses avantages essentiels sont d'être rapide, applicable à de larges variétés de bois et de donner des pâtes de qualité. Il fut découvert vers 1880 lorsque, dans le cycle de régénération, on ajouta, pour compenser les pertes, non pas du carbonate de sodium, mais du sulfate de sodium. On découvrit alors que l'adjonction de sulfure à la liqueur alcaline, contenant essentiellement de la soude, rendait le procédé beaucoup plus efficace, sans pour autant modifier la régénération des produits chimiques, partie de la fabrication qui est très au point.

Dans le procédé kraft, la liqueur blanche est une solution aqueuse contenant de la soude et du sulfure de sodium, à une concentration élevée, égale à environ 200 kg par tonne de bois sec, cette somme représentant le total ($NaOH + Na_2S$). L'ion hydroxyde $OH^-$ est capable de dissoudre la lignine, cette dissolution étant accélérée par la présence des ions sulfure.

Dans la pratique, comme dans le procédé au sulfite, la cuisson a lieu en continu ou en discontinu dans d'immenses réacteurs en acier inoxydable, les lessiveurs; le milieu réactionnel, liqueur blanche et copeaux, est porté à une température voisine de 170 °C, tandis que la pression atteint une dizaine de bars. Comme la liqueur pénètre rapidement dans le bois, la cuisson ne dure que quelques heures : une à deux pour atteindre la température maximum, à laquelle le réacteur est maintenu deux heures environ. Pour réaliser la délignification, l'ensemble des opérations dure environ cinq à six heures. A la fin de la réaction la pâte est « soufflée » : le lessiveur est brusquement ouvert, la pâte est éjectée dans un réservoir. L'eau chaude contenue dans les copeaux est brutalement vaporisée, ce qui entraîne un défibrage partiel de la pâte et facilite le lavage. Généralement, en fin de cuisson, la teneur en lignine n'atteint qu'un faible pourcentage, calculé par rapport au bois initial. Les réactions chimiques qui accompagnent la cuisson sont très complexes, et on ne connaît pas encore parfaitement l'évolution de la concentration des produits chimiques et des principaux constituants du bois pendant la délignification.


La Cellulose du Pin

◄ *Une bobine de papier kraft (liner) à la sortie de la machine à papier. Un tel papier est généralement utilisé pour fabriquer le carton ondulé.*

La pâte est ensuite lavée, puis, le plus souvent, blanchie. C'est une pâte de qualité, qui donne des papiers blancs et solides. On peut dire que la meilleure pâte est obtenue par le procédé kraft à partir de résineux.

La liqueur, issue du lessiveur, a une teneur en matières sèches d'environ 20 %. Elle est concentrée dans un évaporateur à multiples effets ou d'un autre type pour que la teneur atteigne 55 à 60 %. (Parfois, afin de réduire la désagréable odeur de composés soufrés, comme les mercaptans, la liqueur noire subit une oxydation préalable.) A cette teneur, la liqueur est combustible : les matières organiques brûlent en fournissant de l'énergie, le plus souvent de la vapeur à haute pression qui actionne une turbine, productrice d'électricité; les matières minérales fondent et forment le « salin », mélange de carbonate de sodium et de sulfure de sodium. Ce salin en fusion est dissous dans l'eau et donne une liqueur verte caractéristique. Afin de préparer la liqueur blanche nécessaire à la cuisson, qui contient surtout de la soude, on transforme le carbonate de sodium en soude par la réaction de caustification :

chaux éteinte + carbonate de sodium
= soude + carbonate de calcium ;

ainsi, la liqueur verte devient la liqueur blanche qui, après avoir subi une décantation, est recyclée.

Le carbonate de calcium $CaCO_3$ est traité dans un four à chaux. La chaux vive obtenue, CaO, est éteinte par l'eau, et peut être utilisée dans la réaction de caustification. On a ainsi régénéré tous les produits chimiques, sans que les pertes n'excèdent 10 %.

### Les autres procédés

A côté de ces deux procédés, dans lesquels la délignification est réalisée en une seule étape, il existe des procédés à plusieurs étapes, en général deux. Parmi eux, par exemple, la combinaison d'un premier traitement acide suivi d'une cuisson par une liqueur alcaline. Dans un procédé moderne, le procédé soude-oxygène, il n'intervient aucun composé soufré, ce qui a pour avantage de diminuer considérablement la pollution atmosphérique. La première étape est une cuisson à la soude arrêtée


M. Antman - Fotogram

▲ *Hangar de récupération de vieux papiers à la porte de la Villette (Paris). En France, les pâtes à papier de récupération représentent une part importante de la production, puisque environ un tiers du tonnage produit est réutilisé. Par suite de l'augmentation du prix de la pâte à papier et de la nécessité du recyclage, cette récupération s'est développée depuis 1970.*

à un rendement supérieur à 50 %. Le végétal est ensuite défibré, et les fibres obtenues sont, dans le deuxième stade, délignifiées par l'oxygène en milieu alcalin. Ce procédé, expérimenté au stade pilote, pourrait concurrencer les procédés plus classiques.

On cherche à mettre au point d'autres techniques de délignification, en utilisant divers réactifs, comme l'acide nitrique, les composés chlorés, l'ozone, etc.

Il faut, pour terminer ce chapitre, citer les procédés de fabrication de la pâte avec des matériaux autres que le bois, ce qui représente environ 5 % de la production mondiale. Citons tout d'abord la paille. La fabrication de pâte à partir de la paille, avec un rendement de l'ordre de 50 %, peut se fonder sur l'emploi de la chaux vive, à raison d'une centaine de kilos par tonne de végétal sec. Le procédé kraft est utilisé pour traiter les bagasses, nom donné aux tiges de canne à sucre. Dans le domaine que constituent les végétaux pouvant servir de matières premières, il y a place pour une grande variété de traitements : procédés purement chimiques, procédés mécano-chimiques, autant de champs de recherche.

### Les pâtes de récupération

Aux pâtes obtenues à partir de matières premières vierges, il faut ajouter les pâtes de récupération, obtenues à partir de vieux papiers et cartons. Elles représentent une part importante de la production, puisque environ un tiers du tonnage produit en France est réutilisé. Il faut souligner que la situation a beaucoup évolué ces dernières années. Par suite de l'augmentation du prix de la pâte (20 % en 1969) et de la nécessité économique du recyclage, la récupération des fibres cellulosiques s'est développée depuis 1970. La plus grosse partie des fibres récupérées entrent dans la fabrication des emballages, notamment du carton ondulé. Dans ce domaine, une des difficultés essentielles se situe au niveau de l'approvisionnement. A la récupération régulière des invendus de presse ou des déchets de fabrication s'ajoute la récupération volontaire qui évolue rapidement, ne s'organisant que lorsque la demande grandit. En outre, le tri mécanique par voie humide ou sèche des papiers contenus dans les déchets ménagers pose encore des problèmes.

Les papiers d'emballage peuvent être recyclés sans traitement particulier, le plus souvent en mélange pour donner des papiers ayant des performances suffisantes. Les papiers imprimés doivent d'abord être désencrés, ce qu'assure une cuisson légère suivie d'un lavage en plusieurs étapes.

## *Les procédés de blanchiment*

Chacun connaît l'importance de la blancheur pour le papier. Aussi, très souvent, la pâte à papier est-elle blanchie avant d'être transformée en papier.

La première chose à faire est de mesurer la blancheur, donc de définir une échelle. Plus un corps est blanc, plus il réfléchit la lumière. C'est ce principe qui est utilisé, lorsqu'on mesure le pouvoir réfléchissant, ou réflectance, de la pâte soumise à un rayonnement de longueur d'onde bien déterminée. Ainsi, une pâte blanchie aura un degré de blancheur de 90 ; elle sera le constituant essentiel des papiers de haute qualité. Une pâte mi-chimique et blanchie légèrement, comme celle utilisée pour le papier journal, a un degré de blancheur d'environ 60. Enfin, la pâte pour cartons d'emballage, un degré de 15 à 30. La stabilité de la blancheur pose un autre problème ; en effet, la lumière, la chaleur, certains produits chimiques entraînent un jaunissement du papier. Cette altération est due à des réactions chimiques, dans lesquelles la lignine joue un rôle primordial.

Le blanchiment repose entièrement sur les traitements chimiques. On peut classer ces traitements en deux grandes catégories : ceux qui conservent la lignine, la blancheur étant due à la dégradation des groupements chromophores, responsables de la couleur ; ceux, au contraire, qui entraînent une dissolution complète de la lignine. Dans les deux cas, les traitements comportent plusieurs étapes ; la pâte, en suspension plus ou moins concentrée, est blanchie dans des tours, où elle subit, à co-courant ou à contre-courant, l'action des agents blanchissants, à une température souvent voisine de 60-70 °C. Ajoutons que, avant d'être blanchie, la pâte, notamment à la sortie du lessiveur, est lavée, d'abord à l'eau chaude, puis rincée à l'eau, dans une succession de filtres à tambour rotatif.

### Le blanchiment de la lignine

Ce traitement est surtout appliqué aux pâtes mécaniques et mi-chimiques, afin d'améliorer leur blancheur, et ce avec un rendement élevé. Pour décolorer la lignine, deux voies sont possibles : par réduction ou par oxydation. L'agent réducteur le plus couramment utilisé est le thiosulfate de sodium ou de zinc. Parmi les oxydants, citons les peroxydes de sodium et l'eau oxygénée.

Les conditions de traitement varient beaucoup, et l'augmentation du degré de blancheur dépend de l'état initial de la pâte. Pour une pâte mécanique, la blancheur ne peut augmenter de plus de 14 points lors d'un traitement au peroxyde et de plus de 12 points pour un traitement réducteur, quelle que soit la charge d'agent blanchissant. Pour aller plus loin, il est nécessaire de réaliser un traitement en deux stades : par exemple, un traitement oxydant (20 kg par tonne de pâte de $Na_2O_2$), suivi d'un traitement réducteur (10 kg de $Na_2S_2O_4$), permet de gagner jusqu'à 20 points de blancheur. D'une manière générale, le résultat est aussi très sensible au pH, à la consistance de la pâte, qui est souvent de 3 à 5 %, à la température, — une augmentation de température va de pair avec une meilleure blancheur —, au temps. Par exemple, pour le traitement au thiosulfate, l'efficacité la plus grande est obtenue pour un temps de réaction d'une heure vers 50 °C ou d'une demi-heure vers 70-80 °C.

### Le traitement par élimination de la lignine

Le blanchiment des pâtes chimiques est obtenu par l'élimination de la lignine subsistant après la cuisson. C'est toujours une opération qui comprend plusieurs étapes successives : on parle alors d'une séquence de blanchiment. Parmi ces étapes, les principales sont la chloration et l'oxydation par des composés oxydés du chlore.

* *Chloration et extraction par la soude*

La chloration de la lignine était connue dès 1900. Mais il fallut attendre 1930 pour la généralisation de cette réaction, qui demeure la première étape de la plupart des séquences de blanchiment. L'opération est réalisée dans des tours, avec des suspensions de pâte inférieures à 5 % ; les consistances supérieures créent des problèmes au niveau du transport. Si l'on dissout du chlore dans l'eau, en maintenant un pH très faible, le chlore reste à l'état moléculaire. Il réagit rapidement, puisqu'en moins d'un quart d'heure, à la température ambiante, la chloration de la lignine est achevée. Cette réaction n'est efficace que si elle est suivie d'une extraction alcaline, laquelle dégrade également les hydrates de carbone et les résines encore contenues dans la pâte, qui est ainsi purifiée. Cette opération a un bon rendement pour des consistances de l'ordre de 5-15 %, avec une teneur en soude de 0,5 à 3 % par rapport à la pâte, une durée de réaction variant de une à deux heures et la température de 40 à 70 °C. Évidemment, les conditions optimales sont fonction des

caractéristiques de la pâte. De plus, en principe, chaque réaction de blanchiment par oxydation doit être suivie par une extraction alcaline, et on conçoit que la charge en soude sera d'autant plus faible que le degré de blancheur sera élevé.

* *Oxydation par les composés oxygénés du chlore*

L'un des premiers réactifs est l'ion hypochlorite — rappelons qu'il s'agit de l'eau de Javel —, qui apparaît lorsqu'on dissout du chlore en milieu basique. La plupart des traitements à l'hypochlorite se font avec une consistance de 12 à 16 %, à une température aussi basse que possible, inférieure à 35 °C, et le temps de réaction varie de deux heures et demie à quatre heures. La variable essentielle à contrôler est le pH, que l'on doit maintenir entre 8,5 et 10.

Un deuxième agent chloré est le dioxyde de chlore $ClO_2$, qui est très utilisé dans le blanchiment des pâtes kraft. Il est efficace, mais son utilisation pose des problèmes, car il s'agit d'un gaz toxique, très corrosif et dont l'action exige des températures relativement élevées, de 60 °C à 80 °C et un temps de réaction d'au moins trois heures. Le traitement au bioxyde est suivi d'une extraction alcaline, et il permet d'atteindre une blancheur de l'ordre de 90 pour la plupart des pâtes.

* *Les peroxydes*

Comme l'eau oxygénée $H_2O_2$, les peroxydes agissent essentiellement en détruisant les groupements chromophores portés par les macromolécules végétales.

**La pratique du blanchiment**

Pour obtenir un blanchiment convenable, un seul traitement par un des agents ne suffit pas. Aussi a-t-on mis au point des séquences, variables suivant les caractéristiques de la pâte et la blancheur désirées. Par convention, on distingue les stades suivants : la chloration C, l'extraction alcaline à chaud E, une simple purification à froid A, l'oxydation par l'ion hypochlorite H, par le chlorite de sodium S, par le dioxyde de chlore D, par un peroxyde P.

Ainsi, un blanchiment classique à trois étapes s'écrira C/E/H, avec les symboles définis plus haut. On peut donner quelques exemples : outre la séquence C/E/H pour une pâte chimique au sulfite, on aura une plus grande blancheur avec la séquence C/E/H/D. Pour les pâtes kraft, les séquences les plus courantes sont C/E/H/H ou C/E/H/D ou encore C/E/C/E/H. Si on désire des pâtes très bien blanchies, d'environ 93 points, il faudra aller jusqu'à C/E/H/C/H/D/E/D. Autre exemple : un traitement C/E/H/D/P qui dure globalement 15 à 20 heures permet de passer d'une blancheur de 25 à une de 90 environ.

Après le blanchiment, la pâte est soit utilisée immédiatement, soit séchée de manière à obtenir un taux de siccité de 90 %, norme fixée pour la commercialisation.

On a vu les différentes techniques de fabrication de la pâte. Elles sont très variées, comme la qualité des produits qu'elles fournissent. L'industrie de la pâte à papier est une industrie lourde. En Europe, une usine moyenne produit souvent autour de 400 tonnes de pâte par jour. Comme les investissements sont très importants, la fabrication est assez concentrée, et les usines sont installées dans des régions qui permettent un approvisionnement en bois suffisant, le plus souvent à proximité d'un important cours d'eau. On conçoit aisément que la fabrication de la pâte exige beaucoup d'eau, car la plupart des traitements se font avec des consistances de pâtes relativement faibles, à quoi s'ajoute le grand nombre de lavages nécessaires. Aussi n'est-il pas étonnant que, ces dernières années, l'industrie papetière ait énormément investi dans le traitement des eaux. Les mêmes problèmes se posent dans le domaine de la pollution atmosphérique. La cuisson kraft s'accompagne de la formation de mercaptans à l'odeur particulièrement désagréable; les fumées produites par la combustion des liqueurs de cuisson sont le plus souvent chargées de poussière et d'effluents gazeux néfastes pour l'environnement. Là encore, un effort efficace a permis d'améliorer très sensiblement la situation : ces dernières années, les programmes de recherche étaient en grande partie inspirés par la lutte contre la pollution.

La description des différentes techniques de fabrication de la pâte à papier a mis en évidence la grande variété des pâtes selon leurs qualités, leur degré de blancheur, etc. Aussi ne faut-il pas s'étonner que le nombre des différents produits papetiers soit encore plus grand ; depuis l'ouate de cellulose, jusqu'au papier à dessin ou au papier pour carton ondulé. Cependant, avant d'aborder la technique de fabrication, il est nécessaire de donner quelques éléments statistiques, qui souligneront l'importance de l'industrie papetière dans le monde.

Les statistiques réunies dans le *tableau* I ont été publiées par l'O.C.D.E. en 1976. Elles appellent quelques commentaires.

- Entre les années 1970 et 1974, la production globale a augmenté de 14 %, soit 2 % par an en moyenne. En fait, un examen plus détaillé montrerait que le taux de croissance a faibli dès 1974 (il n'est que de 1,4 % entre 1973 et 1974).
- L'Amérique du Nord fournit à elle seule 60 % de la production des pays de l'O.C.D.E. Cette part importante se répartit en 2/3 pour les U.S.A. et 1/3 pour le Canada. Cependant, ce dernier est le plus gros producteur de pâtes mécaniques.
- Notons la faiblesse de la production des pays du Marché Commun. Par exemple, en 1975, la France a produit 1 576 milliers de tonnes de pâte, en a exporté 75,3 et importé 1 107 : autrement dit, la France couvre environ 60 % de ses besoins. Ce déficit varie d'ailleurs suivant le type de fabrication, comme le montrent les statistiques concernant la production du papier.

## La fabrication du papier

Si la production de la pâte est très centralisée, il n'en est pas de même de la fabrication du papier. Il existe encore de nombreuses papeteries dans lesquelles sont fabriquées toutes sortes de papier : papiers d'emballage divers, papier glacé, papier couché... Cependant, les machines à papier fonctionnent toujours suivant le même principe qui mérite une description.

### La machine à papier

Il s'agit de former, à partir des fibres qui constituent la pâte, une feuille mince et résistante. Très souvent, la première opération consiste à raffiner la pâte. Cette action, purement mécanique, consiste à rompre les fibres afin de libérer les fibrilles ; elle est réalisée dans des raffineurs, qui se présentent comme des broyeurs, soit coniques, soit à disques. Le raffinage a pour effet essentiel de rendre la structure cellulosique plus accessible à l'eau. Grâce à lui, l'eau peut pénétrer intimement dans la pâte, d'autant plus que les groupements chimiques de la cellulose peuvent se lier à l'eau, composé polaire, par l'intermédiaire des liaisons hydrogène. Ainsi, les fibres gonflent et gagnent en souplesse. En somme, en augmentant la surface accessible, le raffinage augmente les possibilités de liaison, d'abord avec l'eau, mais ensuite, après élimination de l'eau, entre fibrilles, ce qui ne sera pas sans conséquence sur la résistance du papier à la rupture. Le degré de raffinage d'une pâte est d'ailleurs lié directement à sa capacité de retenir l'eau. Il faut noter que le raffinage n'est pas systématique : si la pâte contient beaucoup de fibres courtes, dues entre autres à la présence d'hémicelluloses, comme c'est le cas, par exemple, des pâtes chimiques à haut rendement, il n'est pas toujours utile de la raffiner. On conçoit aussi que les bois feuillus donnent des pâtes plus faciles à raffiner, car on sait que les fibres de ces bois sont plus courtes que celles des bois résineux.

La pâte, raffinée ou non, est stockée dans le château de pâte, vaste cuvier muni d'un agitateur qui empêche les fibres en suspension dans l'eau de décanter.

Avant d'être envoyée dans la machine à papier, la pâte subit une nouvelle épuration : la suspension est traitée dans des cyclones, dans lesquels la force centrifuge sépare les fibres des impuretés diverses de densité différente. Ce n'est qu'après cette opération que la pâte est pompée dans la caisse de tête, partie essentielle de la machine, puisque c'est là que se forme la feuille. En effet, de même que l'ouvrier, au XIX[e] siècle, faisait une feuille à l'aide d'un tamis qu'il plongeait dans un cuvier rempli de pâte à très faible consistance et qu'il égouttait ensuite, la caisse de tête a pour but de répartir la suspen-

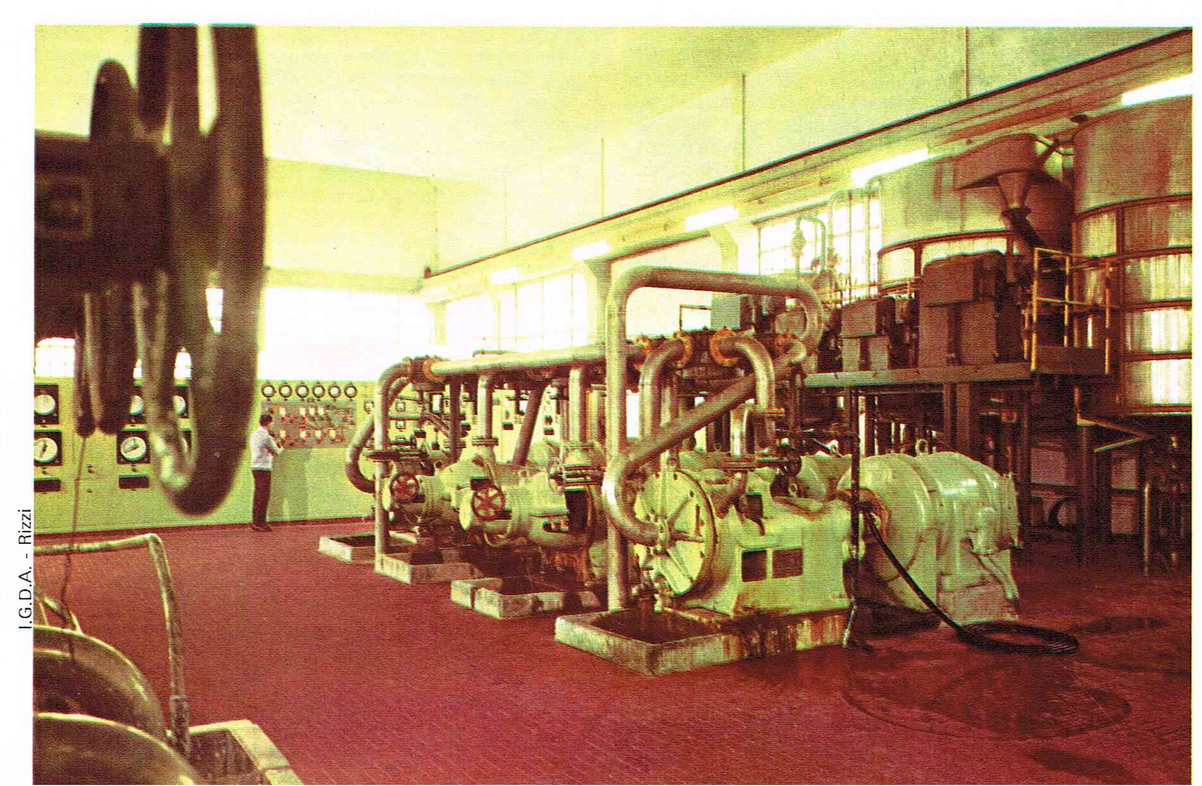
**Tableau I**
**Production de pâtes à papier des pays de l'O.C.D.E.**
**(en milliers de tonnes)**

| Types de pâtes à papier | Années | Marché commun | Pays européens de l'O.C.D.E. | Amérique du Nord | Pays de l'O.C.D.E. | Variations en pourcentage pendant ces 5 ans |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pâtes mécaniques | 1970<br>1974 | 2 534<br>2 503 | 7 623<br>8 355 | 10 844<br>11 586 | 19 764<br>22 135 | + 12 % |
| Pâtes au bisulfite écrues | 1970<br>1974 | 192<br>85 | 1 784<br>1 748 | 2 240<br>2 224 | 4 325<br>4 285 | — 1 % |
| Pâtes au bisulfite blanchies | 1970<br>1974 | 69<br>65 | 3 166<br>3 150 | 2 442<br>2 364 | 5 711<br>5 588 | — 2 % |
| Pâtes au sulfate et à la soude écrues | 1970<br>1974 | 410<br>505 | 4 373<br>5 089 | 16 122<br>17 404 | 22 394<br>25 477 | + 14 % |
| Pâtes au sulfate et à la soude blanchies | 1970<br>1974 | 443<br>701 | 4 757<br>6 016 | 16 954<br>205 586 | 24 422<br>30 170 | + 23 % |
| Pâtes mi-chimiques | 1970<br>1974 | 669<br>717 | 1 477<br>1 672 | 3 286<br>3 770 | 6 693<br>7 311 | + 9 % |
| **Total de la production** | 1970<br>1974 | 5 144<br>5 432 | 23 180<br>26 029 | 51 889<br>57 934 | 83 310<br>94 966 | + 14 % |

▲ *Tableau I : production de pâte à papier dans les pays de l'O.C.D.E. (d'après les statistiques trimestrielles O.C.D.E. 1976/2).*

sion de pâte, de la manière la plus régulière possible, par une fente munie de lèvres réglables, et ceci sur une toile filtrante sans fin, tendue, analogue à un tapis roulant. La vitesse linéaire est très variable : 100 à 400 m/mn pour une machine lente, plus de 500 m/mn pour une machine rapide. Il en est de même de la largeur, qui varie entre 4 et 10 mètres. Sur cette toile, la pâte s'égoutte rapidement tant que les fibres s'orientent dans le sens de la marche. Ensuite, de par la formation d'une couche de fibres qui joue le rôle d'un papier filtre, l'égouttage se fait mal. La toile passe alors au-dessus des caisses aspirantes, dans lesquelles règne une dépression qui entraîne une accélération de l'égouttage, analogue à ce qui se passe lors d'une filtration sous vide. Cette technique de formation de la feuille explique pourquoi les deux côtés de la feuille n'ont pas le même aspect : le côté « toile », qui comporte les fibres longues, est plus rugueux. Par contre, du côté des fibres courtes, les particules les plus fines se déposent en dernier lieu, donnant donc au côté supérieur un aspect plus uni.

Enfin, après les caisses aspirantes, l'élimination de l'eau est poursuivie par un cylindre aspirant, lequel sert également de rouleau d'entraînement de la toile, du côté opposé à la caisse de tête. Les eaux recueillies dans la fosse sous la toile contiennent peu de fibres. Par contre, sous l'effet de l'aspiration au niveau des caisses et du cylindre aspirant, l'eau entraîne des fibres courtes : ce sont les eaux blanches, qui contiennent également les rognures, fibres qui sont éliminées sur les bords de la feuille en formation, afin que ceux-ci soient parfaitement rectilignes. D'ailleurs, cette rectification du bord est obtenue par un simple jet d'eau très fin, qui coupe ainsi



I.G.D.A. - Rizzi

▶ *Le raffinage en cycle continu de la pâte à papier. Cette opération a pour effet de rendre la structure des fibres cellulosiques plus accessible à l'eau ; les fibres sont donc écrasées, frottées et coupées. Elles gonflent et gagnent en souplesse (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*

I.G.D.A. - Rizzi

la couche fibreuse. Ces eaux blanches sont recyclées en amont, pour réaliser la suspension de pâte à quelques pour cent; elle sera épurée et pompée dans la caisse de tête.

La feuille étant formée au sortir de la table filtrante, elle pénètre dans la section des presses. La teneur en eau de la couche de fibres est encore beaucoup trop grande pour que celle-ci puisse être saisie sans se déchirer. Aussi, après son passage sur le cylindre aspirant, la feuille en formation est-elle supportée par un feutre, qui va lui permettre de perdre encore de l'eau sans dommage, par l'action des presses.

Supportant les fibres, le feutre passe entre deux rouleaux, d'écartement variable; la feuille en formation perd encore de l'eau et son épaisseur diminue. L'ensemble du feutre porteur, qui se présente comme une courroie sans fin, et des deux rouleaux d'axes horizontaux qui compressent le feutre et la couche de fibres, constitue une presse. Une machine à papier comporte toujours plusieurs presses, dont la forme, et l'agencement peuvent varier largement, le but étant toujours d'optimiser le coût de l'élimination de l'eau.

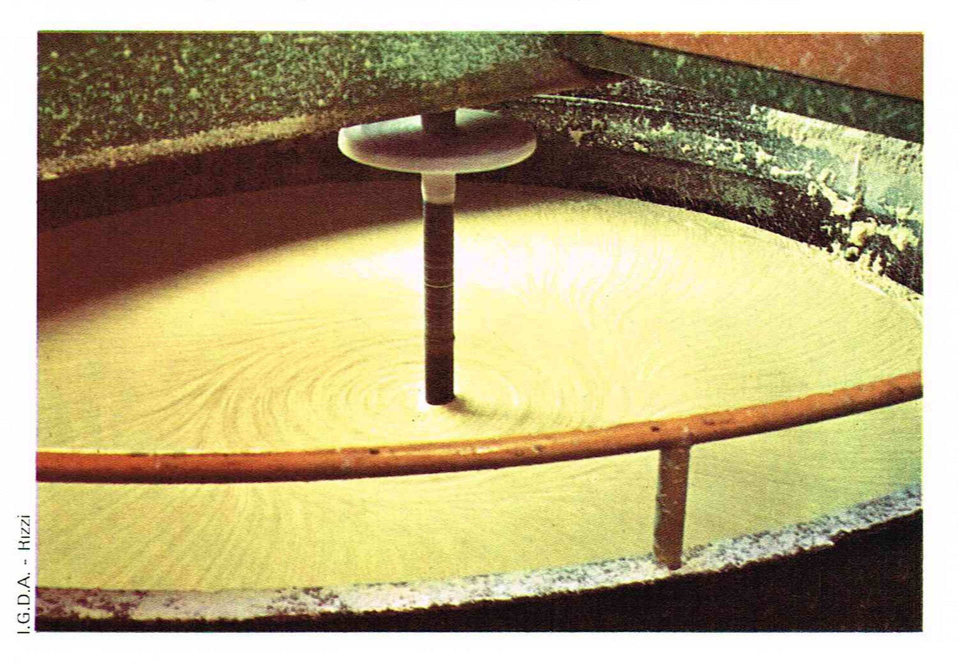
A la sortie de la section des presses, la feuille pénètre dans la « sècherie », où l'eau retenue par les fibres est éliminée par évaporation. Cette opération va consommer beaucoup d'énergie, car il est nécessaire de fournir des calories pour vaporiser l'eau — rappelons que la chaleur latente de vaporisation est très élevée : sa valeur est d'environ 600 kcal/kg, et que le pouvoir calorifique du fuel est d'environ 12 000 kcal/kg —, et fournir l'énergie nécessaire à la rupture des liaisons hydrogène qui existent entre l'eau et la cellulose. Une liaison hydrogène est une liaison de faible énergie — environ 5 à 10 kcal/mole — qui se forme entre un atome d'oxygène et un atome d'hydrogène sans véritable liaison chimique. On voit que l'interaction entre l'eau et les fibrilles est forte car la cellulose porte de nombreux groupements OH, qui vont former des liaisons hydrogène avec l'eau $H_2O$. Cette humidité va donc être très difficile à éliminer, beaucoup plus difficile que l'eau retenue par capillarité entre les pores. On estime qu'en moyenne, dans la sècherie, la consommation d'énergie liée seulement à l'élimination de l'eau est d'environ 1 200 kcal par kilogramme d'eau évaporée, soit le double de la chaleur correspondant à la simple évaporation.

Dans la partie sèche de la machine, la résistance de la feuille est souvent suffisante pour que celle-ci n'ait plus besoin d'être supportée par un feutre. La sècherie se présente comme une immense étuve, dans laquelle la feuille de papier, par l'intermédiaire d'un grand nombre de rouleaux, suit un trajet compliqué tout en étant soumise à des courants d'air chaud. Ces cylindres sont ultérieurement chauffés à la vapeur, et la feuille est plaquée sur leur surface par un feutre, qui est séché par ailleurs. A la sortie de la sècherie, le papier, qui contient encore 5 à 10 % d'humidité résiduelle, est mis en bobine par une enrouleuse. Il est ainsi prêt pour subir d'autres traitements ou être utilisé tel quel.

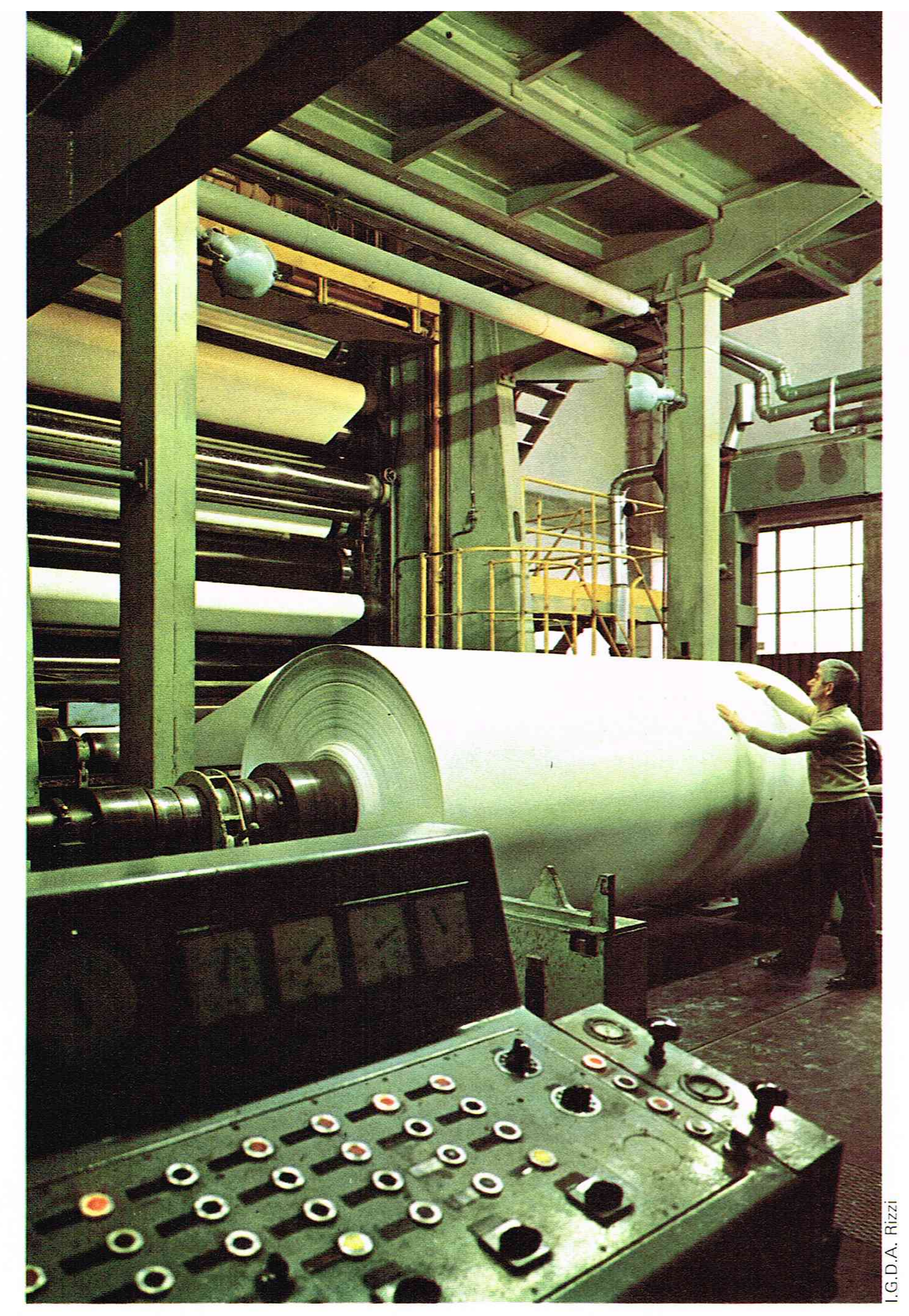
Cette courte description d'une machine à papier laisse imaginer que c'est une machine impressionnante. Le visiteur reste toujours surpris devant une machine qui

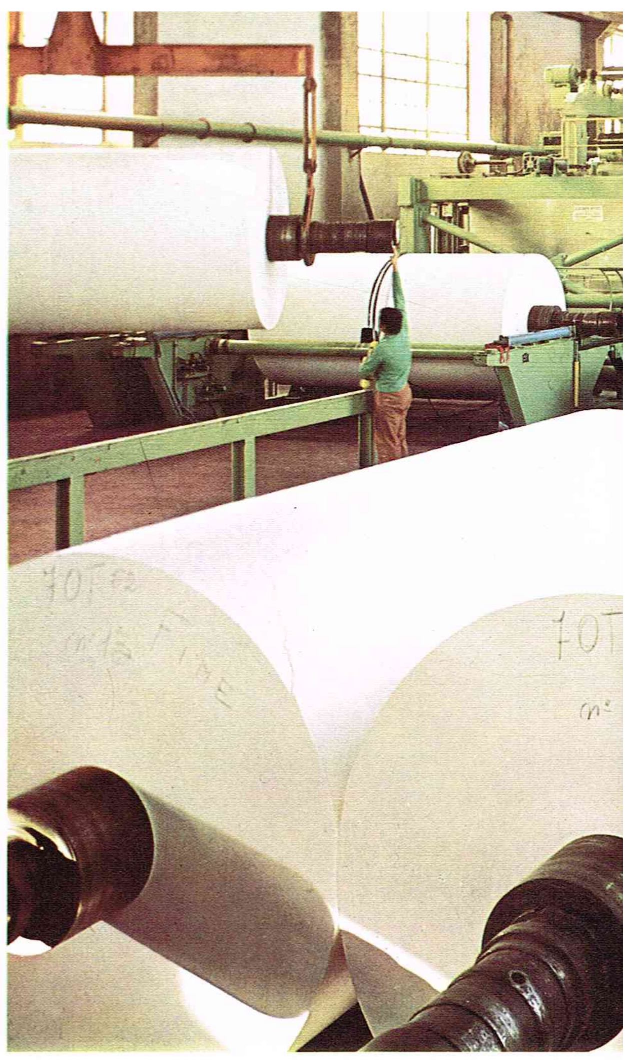
***▲ Une machine à papier : la pâte épurée est envoyée par la caisse de tête sur une toile filtrante sur laquelle elle s'égoutte, tandis que les fibres s'orientent dans le sens de la marche (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).***

***▼ La pâte est souvent stockée entre deux opérations, dans de vastes bacs munis d'un agitateur pour empêcher les fibres de décanter (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).***



I.G.D.A. - Rizzi





I.G.D.A. Rizzi

▲ *A gauche, une calandre, appareil servant à rendre la surface du papier moins rugueuse ; ce polissage est obtenu par frottement sur des rouleaux de cellulose. A droite, un atelier de traitement de surface du papier (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*
▼ *Tableau II : production de papier journal.*

**Tableau II**
**Production de papier journal (en milliers de tonnes)**

| Pays concernés | 1970 | 1974 |
|---|---|---|
| Pays du Marché commun | 2 136 | 1 695 |
| Pays européens appartenant à l'O.C.D.E. | 5 450 | 5 141 |
| dont la Finlande | 1 305 | 1 219 |
| dont la Norvège | 554 | 519 |
| dont la Suède | 1 030 | 1 210 |
| Amérique du Nord | 10 849 | 11 630 |
| dont le Canada | 7 814 | 8 662 |
| dont les U.S.A. | 3 035 | 2 968 |
| Ensemble des pays de l'O.C.D.E. | 18 604 | 19 417 |

fabrique une feuille de plus de 5 m de largeur, à une vitesse de 10 m/s. Une telle machine pose des problèmes de régulation, et, dans ce domaine, un gros effort a été réalisé ces dernières années ; une fabrication régulière se caractérise par une bonne régularité de l'épaisseur de la feuille — on parle de grammage, en g/cm$^2$ — tant dans le sens longitudinal que dans le sens transversal, et un bon contrôle de l'humidité à la sortie de la sècherie. Le grammage est mesuré en continu à l'aide d'une jauge $\beta$ : un composé radio-actif émet un rayonnement $\beta$, et l'absorption de ce rayonnement par la feuille est évidemment liée à son épaisseur. Quant à l'humidité, on utilise généralement la spectrophotométrie aux infrarouges ou des mesures de constante diélectrique. Les indications données par ces deux capteurs sont saisies et traitées par un calculateur, qui détermine et déclenche les actions nécessaires sur la caisse de tête (débit de pâte) et sur la sècherie (pression de vapeur). Ajoutons que la régulation de la couleur est également possible. Le maintien des conditions de fonctionnement d'une machine autour d'un point de consigne ne pose plus de problème. Il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de changer de régime. Dans un autre domaine, des tentatives ont été faites pour modifier la technique de formation de la feuille, mais elles n'ont pas été développées à grande échelle.

### *Les différents papiers*

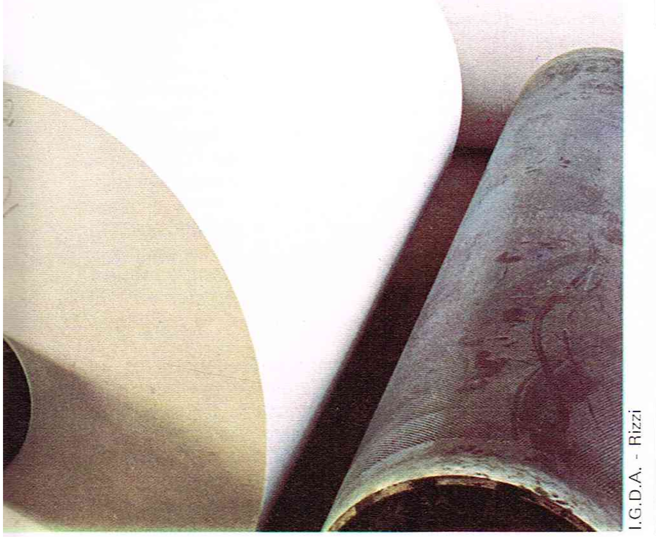
Les papiers, chacun le sait, sont très divers : papier journal, papier bible, papier monnaie...

#### Les papiers de presse

Commençons par le papier journal, avec quelques éléments statistiques relatifs à la production, exprimée en milliers de tonnes, réunis au *tableau* II. Une autre indication intéressante concerne les importations (*tabl.* III) et les exportations (*tabl.* IV), en milliers de tonnes.

Les chiffres sont nets : le Marché Commun produisait la moitié de sa consommation en 1970, et seulement 40 % en 1974. Les États-Unis consomment à eux seuls environ un tiers de la production des pays de l'O.C.D.E., mais ne produisent que 30 % de leur consommation. Les grands exportateurs sont évidemment le Canada et les pays scandinaves.





I.G.D.A. - Rizzi

| Tableau III<br>Importation de papier journal<br>(en milliers de tonnes) | | |
|---|---|---|
| Pays concernés | 1970 | 1974 |
| Pays du Marché commun | 2 231 | 2 860 |
| Pays européens appartenant à l'O.C.D.E. | 2 400 | 3 074 |
| U.S.A. | 6 019 | 6 712 |

| Tableau IV<br>Exportation de papier journal<br>(en milliers de tonnes) | | |
|---|---|---|
| Pays concernés | 1970 | 1974 |
| Pays du Marché commun | 133 | 83 |
| Pays européens appartenant à l'O.C.D.E. | 2 550 | 2 587 |
| dont la Finlande | 1 187 | 1 137 |
| dont la Norvège | 476 | 460 |
| dont la Suède | 687 | 944 |
| U.S.A. | 130 | 171 |
| Canada | 7 891 | 7 354 |

Le papier journal ordinaire est composé essentiellement de pâte mécanique écrue (pour 80 %) et de pâte chimique pour le reste. Ces pâtes ne sont pas blanchies, d'où la couleur caractéristique du papier journal. C'est un papier opaque, poreux, fixant très bien l'encre. Il est toujours produit sur des machines très importantes, larges et rapides. Son grammage est d'environ 50 g/m$^2$; il ne contient en général aucun adjuvant, et il est simplement « lissé ».

Le lissage est une opération qui a pour but de rendre la surface du papier moins rugueuse. Ce résultat est obtenu soit par compression, soit par polissage. Dans le premier cas, le papier est compressé entre des rouleaux en fonte ou en acier poli. Dans le deuxième cas, le polissage est obtenu par frottement sur des rouleaux de cellulose qui constituent une calandre. Cette machine comporte essentiellement une série de rouleaux horizontaux reposant les uns sur les autres et maintenus dans un bâti vertical. Les rouleaux sont alternativement en acier poli et en cellulose compressée, le premier et le dernier étant toujours en acier. La feuille est engagée entre les deux rouleaux supérieurs, puis passe alternativement d'un rouleau à l'autre et atteint ainsi le rouleau inférieur. Comme les rouleaux en cellulose ont une vitesse de rotation toujours supérieure à celle des rouleaux métalliques, le papier subit au passage entre deux rouleaux une friction intense qui produit l'effet de polissage recherché.

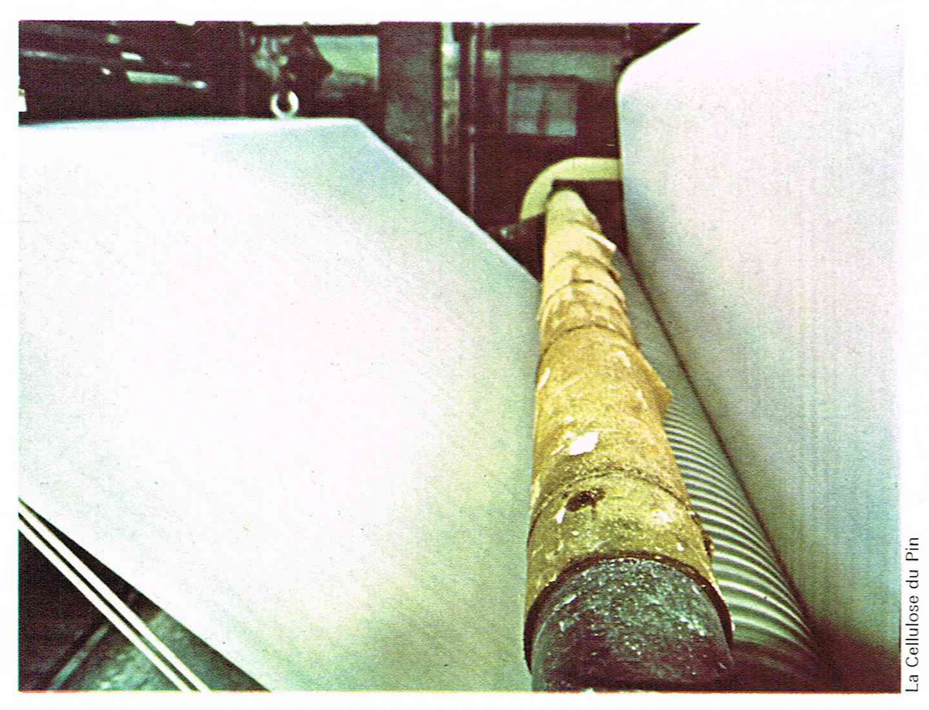
Le papier journal ordinaire est le matériau utilisé pour les quotidiens. Il existe du papier journal amélioré, dont la teneur en pâte chimique est plus élevée, un tiers au lieu d'un cinquième. Ces pâtes sont partiellement blanchies; le grammage de ces papiers se situe autour de 60-65 g/cm$^2$, et ils contiennent souvent des charges minérales. En effet, lors de la fabrication de certains papiers, on ajoute à la pâte des charges minérales (le plus souvent du kaolin, silico-aluminate naturel exploité dans des carrières ou des mines. C'est un produit économique qui, ajouté à la pâte dans des proportions de 5 à 30 %, en poudre très fine, donne au papier une meilleure imprimabilité, sans modifier son opacité et sans lui enlever trop de ses propriétés mécaniques).

On utilise également d'autres additifs minéraux, comme l'oxyde de titane, pigment blanc qui intervient dans la

▲ *Tableau III : importation de papier journal.*
*Tableau IV : exportation de papier journal.*
▼ *Le séchage de la pâte est réalisé par de l'air chaud, dans une étuve munie d'un grand nombre de rouleaux chauffés à la vapeur (papeterie de Tolmezzo et Cisalpina, Intra, Italie).*



I.G.D.A. - Rizzi



La Cellulose du Pin

▲ *La cellulose possédant une grande affinité avec l'eau, il est nécessaire de traiter le papier destiné à l'impression ou à l'écriture; une des techniques utilisées est le* couchage, *obtenu par le dépôt d'une fine couche de matière minérale hydrophobe (kaolin, carbonate de calcium ou sulfate de baryum) en présence d'une substance adhésive; ce dépôt est réalisé par l'intermédiaire d'un rouleau en rotation immergé partiellement dans la suspension.*

▼ *Tableau V : production de papier pour l'impression et l'écriture.*

fabrication des papiers caractérisés par une grande opacité et un faible grammage, comme le papier bible.

Il existe aussi du papier journal amélioré, par un couchage léger.

**Les papiers d'impression-écriture**

Ils sont légion, allant des livres ordinaires jusqu'aux billets de banque en passant par les cahiers, les papiers à lettre... La matière première essentielle est la pâte chimique blanchie; si de la pâte mécanique est ajoutée, elle est blanchie elle aussi. Ces papiers contiennent toujours des charges, et s'ils doivent être utilisés en présence d'eau, ils sont collés.

On sait que la cellulose possède une très grande affinité avec l'eau, ce qui est un inconvénient lorsque le procédé d'écriture ou d'impression lui-même fait intervenir de l'eau (écriture manuelle, impression offset). Aussi pratique-t-on le collage, qui est un traitement de surface des fibres par un agent hydrophobe. Cet agent, le plus souvent à base de colophane, est ajouté à la pâte raffinée, dans le château de pâte, avant pompage dans la caisse de tête. Il précipite sur les fibres par action du sulfate d'alumine, rendant ainsi la cellulose suffisamment hydrophobe pour permettre l'écriture manuelle, sans pour cela imperméabiliser le papier. Certaines résines peuvent avoir un double effet : diminuer l'affinité de la cellulose avec l'eau, mais aussi augmenter la résistance du papier par suite de la création de fortes liaisons intermoléculaires supplémentaires.

Les papiers d'impression-écriture, notamment ceux utilisés pour les livres de belle présentation, sont « couchés ». Le couchage consiste à déposer en surface de la feuille de papier un revêtement qui est le plus souvent une poudre très fine de matière minérale (kaolin, carbonate de calcium, sulfate de baryum) en présence d'un adhésif. Un papier couché présentera donc beaucoup moins d'irrégularités superficielles, et sa porosité en surface sera beaucoup plus faible. Les procédés utilisés pour déposer en surface cette pellicule minérale varient, bien que l'opération se déroule toujours en phase aqueuse. Il y a toujours trois opérations : dépôt de la couche, égalisation de son épaisseur, séchage. En général, le dépôt est réalisé par l'intermédiaire d'un rouleau en rotation immergé partiellement dans la suspension, contre lequel est appliquée la feuille de papier. L'égalisation de la couche est obtenue soit par l'intermédiaire d'une lame d'air — c'est le cas des machines déjà anciennes, et le revêtement atteint 20 à 30 g/m² et par face —, soit par une lame traînante, qui assure un dépôt plus fin et une vitesse plus grande. Parfois, si un couchage très léger est suffisant, il peut intervenir pendant la fabrication de la feuille elle-même, par un aménagement de la machine à papier. La troisième étape, le séchage, est réalisée par l'air chaud.

Les papiers d'impression sont utilisés pour les livres, mais leur qualité varie dans de larges proportions, suivant d'ailleurs les techniques d'impression. Par exemple, la technique offset exige des papiers collés, car elle est mise en œuvre en présence d'eau. Les livres ordinaires, imprimés en typographie, sont réalisés en papier brut de machine, non collé et peu chargé. Les papiers couchés constituent le matériau de choix pour les livres et séries illustrées.

Les papiers d'écriture forment aussi une gamme très variée : les papiers à cahiers, les papiers pour imprimante de calculateur. En général, la matière première est une pâte chimique blanchie, et colles et charges sont souvent en proportion élevée.

Citons quelques papiers particuliers :

● Le papier pour fabriquer les billets est réalisé à partir de chiffons; s'il s'agit de titres, on peut ajouter un peu de pâte chimique.

● Les papiers à cigarettes sont très légers — 10 à 20 g/m² —; ils sont obtenus essentiellement avec des pâtes chimiques, de même que les papiers « pelure ».

● Les papiers « bible » contiennent des fibres végétales de lin et de coton, mais on a tendance à y adjoindre de plus en plus des pâtes chimiques de qualité.

● Enfin, le papier buvard de qualité est à base de chiffons. Souvent, en fait, il est obtenu à partir de pâte chimique, sans l'addition d'aucun adjuvant.

La consommation de papier varie énormément d'un pays à l'autre, les États-Unis arrivant en tête, avec presque 300 kg par habitant et par an, le Français n'en consommant que la moitié, environ 140 kg/an. Il en est de même de la production, comme le montre le *tableau* V.

On peut remarquer que la production de papiers pour impression et écriture est mieux répartie que celle du papier journal. Cette production est en augmentation constante : 26 % entre 1970 et 1974, et cela malgré une stagnation entre 1970 et 1971 et les problèmes économiques dus, en 1973, au renchérissement subit de l'énergie. Il est probable que cette croissance continuera, parallèlement au perfectionnement des procédés d'impression et de reproduction, notamment avec le développement de l'informatique.

**Tableau V**
**Production de papier pour l'impression et l'écriture (en milliers de tonnes)**

| Pays concernés | 1970 | 1974 |
|---|---|---|
| Pays du Marché commun | 6 575 | 7 947 |
| dont la R.F.A. | 1 889 | 2 314 |
| dont la France | 1 418 | 1 792 |
| dont l'Italie | 1 201 | 1 368 |
| dont le Royaume uni | 1 145 | 1 291 |
| Pays européens appartenant à l'O.C.D.E. | 9 525 | 12 525 |
| dont la Finlande | 981 | 1 819 |
| dont la Norvège | 326 | 358 |
| dont la Suède | 537 | 833 |
| Amérique du Nord | 10 706 | 13 064 |
| dont le Canada | 922 | 1 094 |
| dont les U.S.A. | 9 784 | 11 970 |
| Ensemble des pays de l'O.C.D.E. | 22 641 | 28 557 |

## BIBLIOGRAPHIE

Mac DONALD R. G., *Pulp and Paper Manufacture* (3 volumes), prepared under the direction of the Joint Texbook Committee of the Paper Industry, Mac Graw Hill Book Company, 1969. - RYDHOLM S. A., *Pulping Processes,* John Wiley & Sons Ltd, New York, 1965. - *Pâtes et Papiers,* statistiques trimestrielles, 1976/2, O.C.D.E., 1976.

# LES TECHNIQUES DE PRESSE

Les techniques de l'imprimerie traditionnelle et de la grande presse sont, à peu de chose près, identiques. Les exigences de la seconde sont essentiellement, on le verra, la possibilité de rapides modifications dans les textes et une cadence de tirage très importante.

On distingue essentiellement deux types d'opérations dans l'ensemble de ces techniques :

— l'*impression*, phase finale, où s'effectue le rapprochement de l'encre et du papier au contact d'une *forme*, intermédiaire qui reçoit l'encre et la transmet au papier ;

— la *composition*, constitution de cette forme, écriture des textes, montage, adaptation de la forme à la machine à imprimer.

Les *techniques d'impression* se divisent en trois procédés :

- l'utilisation du relief : la forme encrée se décalque par pression sur le papier ; c'est l'impression typographique ;
- l'impression en creux ou héliogravure : la forme présente des creux remplis d'encre ;
- l'offset qui utilise la répulsion entre eau et encre.

Les *techniques de composition* sont au nombre de deux :

- la composition typographique, aux caractères de plomb, en relief ;
- la photocomposition, composition des textes sur un papier photographique.

Toutes deux peuvent servir à constituer les formes utilisables par les trois procédés d'impression.

Mais l'évolution historique distingue deux périodes très inégales : l'*ère du plomb*, associant composition et impression typographiques ; l'*ère de la lumière*, après l'invention de la photographie, qui a permis l'illustration des textes typographiques par la photogravure. C'est la même gravure qui constitue le principe de l'héliogravure. Elle est modelée par la lumière qui passe à travers un transparent photographique, tout comme lors de la préparation de la plaque offset. La photocomposition est la technique la mieux adaptée à la préparation de ce document photographique.

## *Le plomb*

Quand, en 1631, Théophraste Renaudot, le premier en France, crée un journal, *La Gazette*, l'événement, aujourd'hui historique, n'est ressenti que par une infime minorité de la population. Bien sûr, le nombre des illettrés, la difficulté des communications expliquent, pour l'essentiel, ce manque de succès. Mais l'état de la technique interdit toute velléité de diffusion, rend impossible une parution fréquente et réserve à quelques privilégiés la lecture d'un journal au prix exorbitant. C'est qu'après deux siècles l'imprimerie n'a guère évolué depuis son invention par Gutenberg, vers 1450.

### *La composition typographique*

L'invention de Gutenberg concerne à la fois la composition des textes et leur impression.

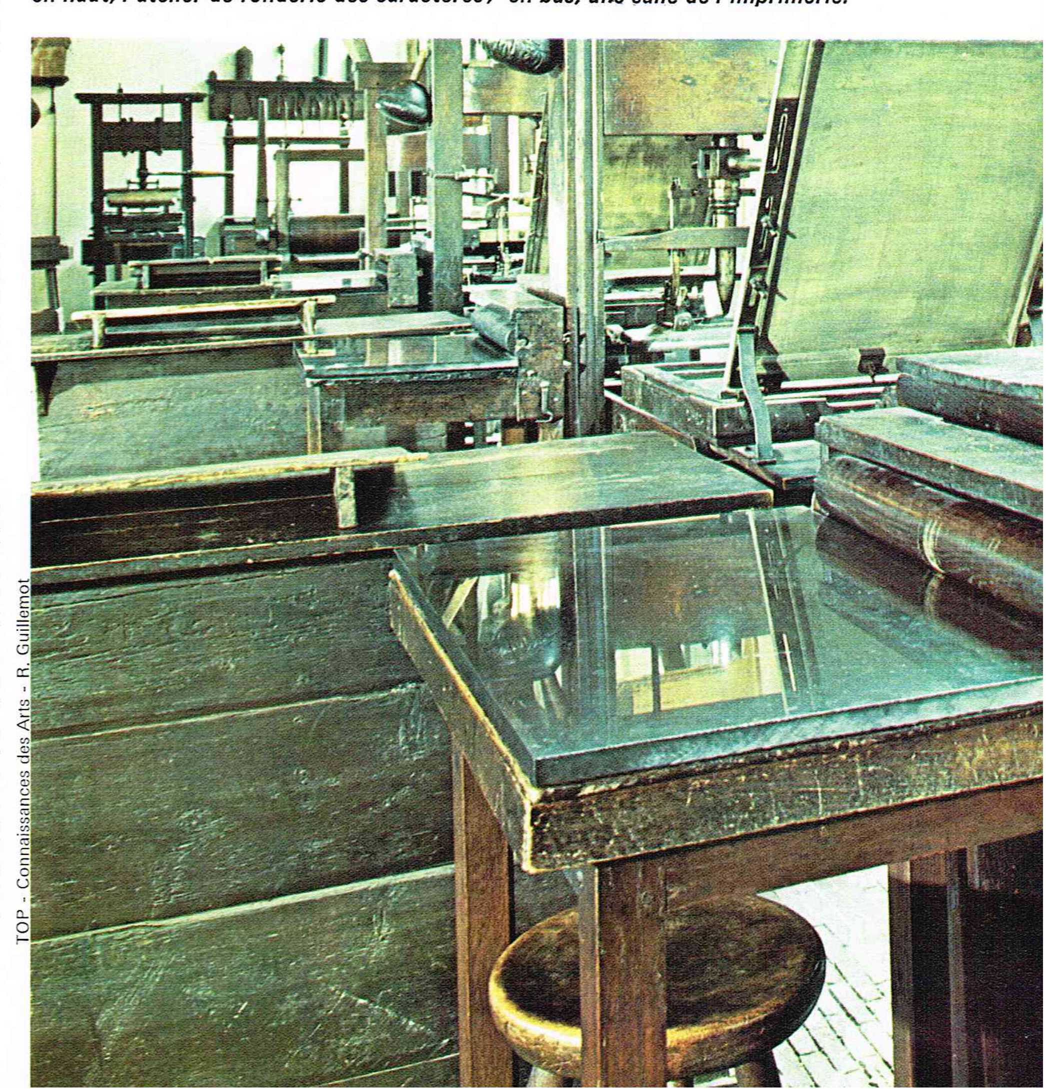
Avant lui, déjà, on utilise des planchettes gravées, notamment pour l'impression des cartes à jouer : c'est la « xylographie ». Dessins et lettres à reproduire sont gravés, en relief, dans la planche. Une encre est appliquée et la feuille de papier est plaquée à l'aide d'une balle ou d'une brosse. Le travail de gravure est évidemment très long, et le bois ne résiste guère.

On pense donc, tout naturellement, à utiliser des lettres séparées, toujours en bois. Ainsi naît la notion de « composition ». Mais le nombre des caractères à tailler ne permet qu'une très faible accélération du procédé. Et Gutenberg, qui à l'origine était orfèvre, apporte l'innovation décisive : ses caractères mobiles sont moulés comme le sont déjà, à l'époque, les pièces de monnaie. La matrice gravée permet de reproduire les lettres à de très nombreux exemplaires. Le métal utilisé pour la fonte est un alliage, dont les proportions peuvent varier de quelques points mais dont les composants sont demeurés les mêmes jusqu'à nos jours : le plomb (84 % environ), l'antimoine (12 % environ) et l'étain.



TOP - Connaissance des Arts - R. Guillemot

▲▼ *Fondée en 1576, à Anvers, l'imprimerie Plantin a été transformée en musée ; en haut, l'atelier de fonderie des caractères ; en bas, une salle de l'imprimerie.*



TOP - Connaissances des Arts - R. Guillemot



I.G.D.A. - Rizzi

▲ *Lors de la* composition manuelle, *les caractères d'imprimerie pris dans les casses sont assemblés sur une sorte de règle (le* composteur*) munie d'un curseur; les différentes lignes sont ensuite réunies dans une forme qui sert à l'impression; après utilisation, les caractères sont reclassés.*
▼ *La* Linotype *est un matériel de base pour les ateliers de presse; la machine, par l'intermédiaire d'un clavier, assemble non pas les signes mais les moules ou matrices qui forment des lignes en creux dans lesquelles est injecté le plomb.*

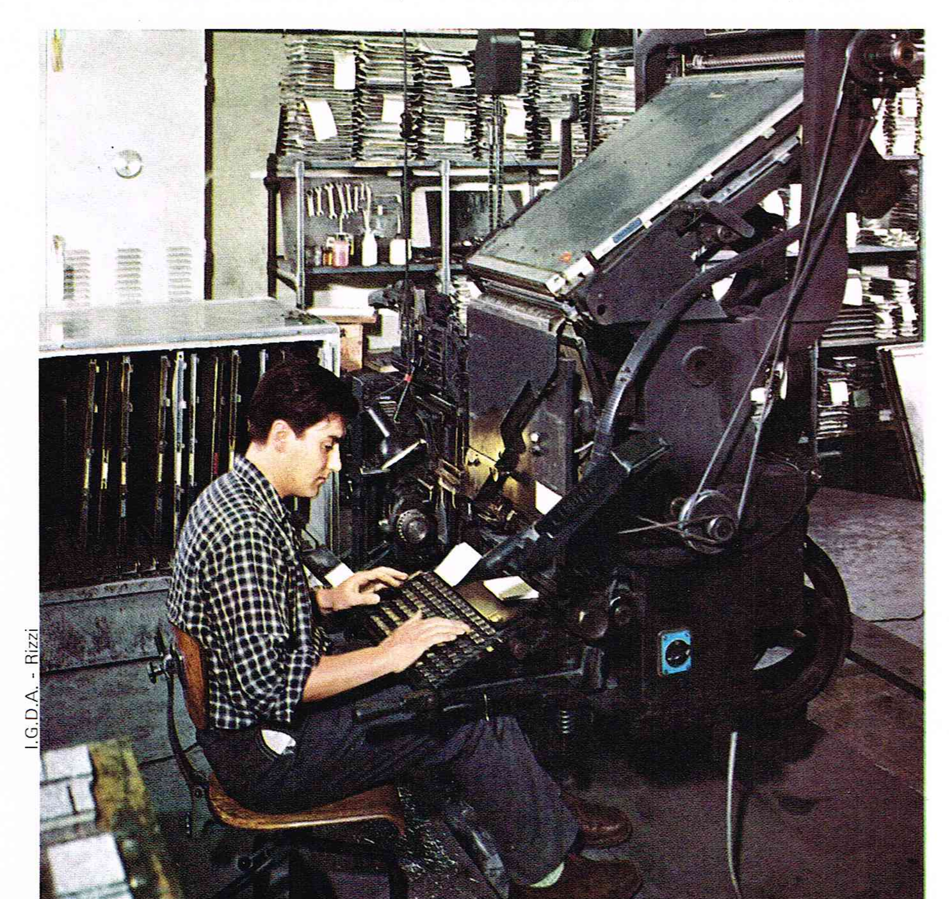
**La composition manuelle**

Le texte est composé à la main. Le compositeur assemble les caractères qu'il prend dans les alvéoles de la *casse*. Chaque compartiment contient une même lettre en de nombreux exemplaires. Les plus utilisées sont évidemment les mieux en vue. La partie supérieure contient les majuscules ou *capitales;* les minuscules sont disposées plus bas. Cette place leur vaut le nom de *bas de casse*, employé, aujourd'hui encore, en langage d'imprimerie.

Chaque casse correspond à une *famille* de caractère. Car, si les ouvriers de Gutenberg ont d'abord cherché à imiter l'écriture manuelle, l'inspiration des imprimeurs et des artistes a multiplié les formes, et le nombre des différents caractères est aujourd'hui considérable. La série complète des lettres et signes (leur nombre étant proportionnel à la fréquence d'emploi) s'appelle une *police de caractères*.

Le *compositeur* aligne les caractères dans une sorte de règle, le *composteur*. Un curseur règle la largeur de la ligne : les blancs ajoutés entre les mots permettent de donner la même dimension aux lignes d'un même texte : c'est la *justification*. Ainsi composées, une à une, les lignes sont assemblées dans une *forme*. C'est elle qui sert à l'impression proprement dite.

Après l'impression, les caractères sont repris et reclassés pour les utilisations ultérieures.



I.G.D.A. - Rizzi

**La composition mécanique**

En raison de sa lenteur, la composition manuelle est abandonnée depuis longtemps pour le corps des articles. La composition, d'abord mécanisée, a reçu ensuite l'assistance de l'informatique. Dans les ateliers « au plomb », la composition manuelle demeure néanmoins employée pour les gros titres et certains assemblages délicats, certains pavés publicitaires notamment.

Le progrès immédiatement réalisable semble être le remplacement mécanique des gestes du compositeur. Et les premiers efforts y tendent, en effet. Au début du XIXe siècle, de nombreux inventeurs réussissent à assurer la distribution mécanique des lettres et des signes dans le composteur : l'opérateur déclenche la descente en appuyant sur des touches. Mais c'est encore à la main qu'il ajoute les espaces de justification. D'autre part, la mécanisation est limitée par la redistribution des pièces dans les alvéoles correspondantes après usage. Ce problème est résolu par la mise au point d'un système d'encoches, comparables à celles des clefs; à chaque caractère correspond une formule d'encoches ouvrant l'accès à la casse déterminée et à elle seule.

Le procédé fait souche, mais dans une machine beaucoup plus révolutionnaire, matériel de base de tout atelier de presse jusqu'à nos jours : la *Linotype*. Son principe essentiel fait fi de tous les perfectionnements antérieurs : les caractères ne servent qu'une fois; ils sont ensuite refondus. La machine assemble non les signes, mais leurs moules (ou *matrices*) qui forment des lignes justifiées complètes, en creux, dans lesquelles est injecté le plomb.

Présentée pour la première fois à New York, en 1884, par son inventeur, l'horloger Ottmar Mergenthaler, la Linotype (nom de marque) connaît un tel succès qu'elle donne son nom à ce type de machine et à un métier, celui de linotypiste.

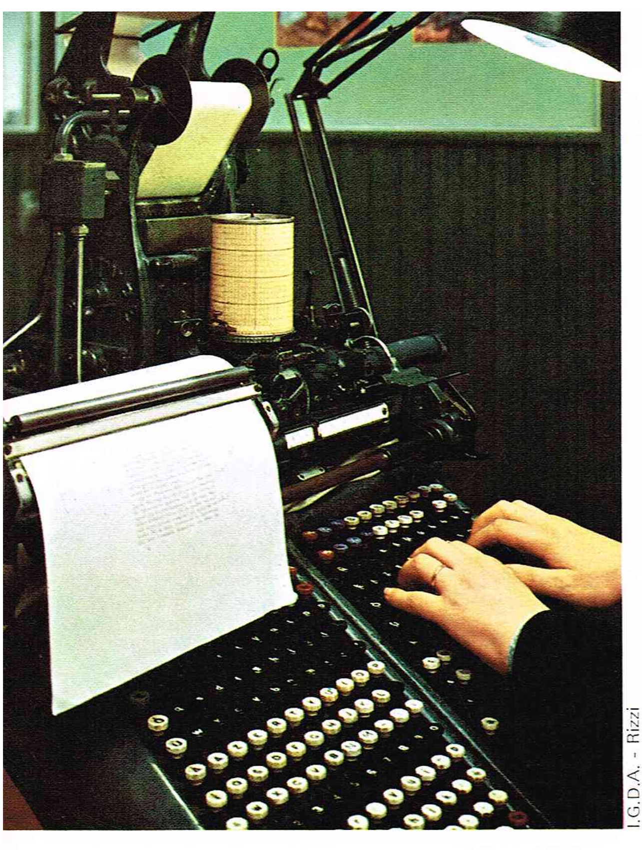
Celui-ci opère sur un clavier de 90 touches correspondant, chacune, à un magasin. La frappe provoque la descente des matrices dans une glissière. Chaque matrice, plaquette de laiton ou de cuivre de trois centimètres sur deux, porte sur la tranche la forme d'un caractère, inscrite en creux. Une touche libère les « espaces bandes », plaquettes spéciales, taillées en coins, qui séparent les mots. Matrices et espaces bandes descendent dans le composteur que surveille le claviste. Lorsque la ligne est complète, une manœuvre l'envoie sur un autre circuit tandis que l'opérateur en entame une autre.

La ligne de matrices est automatiquement amenée contre des mâchoires, préalablement réglées à la justification désirée. Les espaces bandes sont alors enfoncés plus profondément jusqu'à ce qu'ils bloquent parfaitement la ligne. Elle se présente devant le creuset de plomb fondu où l'alliage est maintenu à une température de 275 °C environ par un système de chauffage électrique ou au gaz. Le plomb injecté forme la ligne, cette fois en relief. Le passage entre des couteaux ajuste exactement sa hauteur. Elle tombe dans la galée où l'attendent les lignes déjà composées.

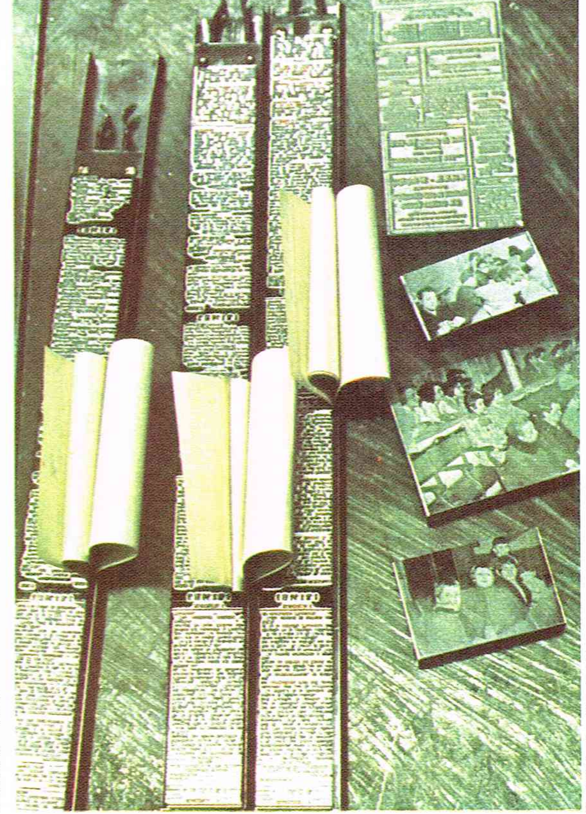
Pendant ce temps, aiguillés par leurs crans, matrices et espaces bandes sont remontés dans leurs magasins respectifs, prêts à un nouvel usage.

Chaque article est ainsi composé dans un caractère particulier à chaque machine : les magasins sont interchangeables. La Linotype présente l'inconvénient d'exiger le remplacement de la ligne complète (voire de plusieurs en cas d'oubli d'un mot) pour la correction d'une faute. Un linotypiste peut ainsi « descendre » de 6 000 à 9 000 signes à l'heure.

Apparue en même temps que sa concurrente, la *Monotype* comporte, elle, deux éléments séparés : un clavier de quelque 300 touches, correspondant à plusieurs alphabets, et une fondeuse. Par un poinçon à air comprimé, le claviste perfore une bande de papier qui commande la fondeuse. Les caractères sont, cette fois, fondus un à un et alignés dans la justification. Les trous de justifi-



I.G.D.A. - Rizzi



C. Michel - Explorer

◀ *A gauche, un clavier de* Monotype *; ce type de clavier comporte environ 300 touches correspondant à plusieurs alphabets ; par l'intermédiaire d'un poinçon à air comprimé, le claviste perfore une bande de papier qui commande la fondeuse de caractères d'imprimerie. A droite, sur le marbre, on peut observer du texte composé en* Linotype *(à gauche) et prêt à être mis en page, avec en haut un cliché trait et en bas trois similis.*

cation portés sur la bande par le claviste, en fin de ligne, déterminent la largeur des espaces entre les mots.

La Monotype présente les avantages d'une correction possible lettre par lettre et d'une rapidité plus grande, mais les caractères mobiles sont difficilement maniables, et la Linotype lui est préférée dans la presse : les machines à lignes blocs sont les plus utilisées dans les journaux à composition typographique.

La composition en lignes blocs de plomb a, enfin, subi de nouveaux perfectionnements avec le développement de machines au clavier déconnecté, comme sur la Monotype. La frappe de l'opérateur limitant les possibilités de la machine à composer, les deux fonctions sont séparées : le claviste perfore une bande qui commande la fondeuse. Une même machine peut ainsi traiter la production de plusieurs opérateurs. La bande permet en outre l'éventuelle commande d'une fondeuse à distance, système utilisable par exemple depuis un bureau détaché pour les éditions régionales. Certains systèmes sophistiqués admettent aussi la correction entre la frappe et la fondeuse.

### La mise en page

La mise en page est l'opération qui donne à une publication sa personnalité.

Le metteur en page dispose titres et colonnes de texte dans un châssis au format du journal, et cela en fonction des indications d'une maquette préparée par un journaliste secrétaire de rédaction. Les lignes sont séparées et bloquées en largeur par des bandes de plomb, ou par des filets dont le relief marquera, à l'impression, un trait plus ou moins gras. La page est également calée en hauteur par de minces lames, coincées entre les lignes, puis serrée grâce à un système de crémaillères prévu sur les côtés du châssis et entraîné par une clef à pignon denté.

La page est encrée. Une première épreuve est tirée, la « morasse », grâce à laquelle on peut apporter les ultimes corrections avant le « bon à tirer ». La page ainsi confectionnée constitue la forme prête à l'impression.

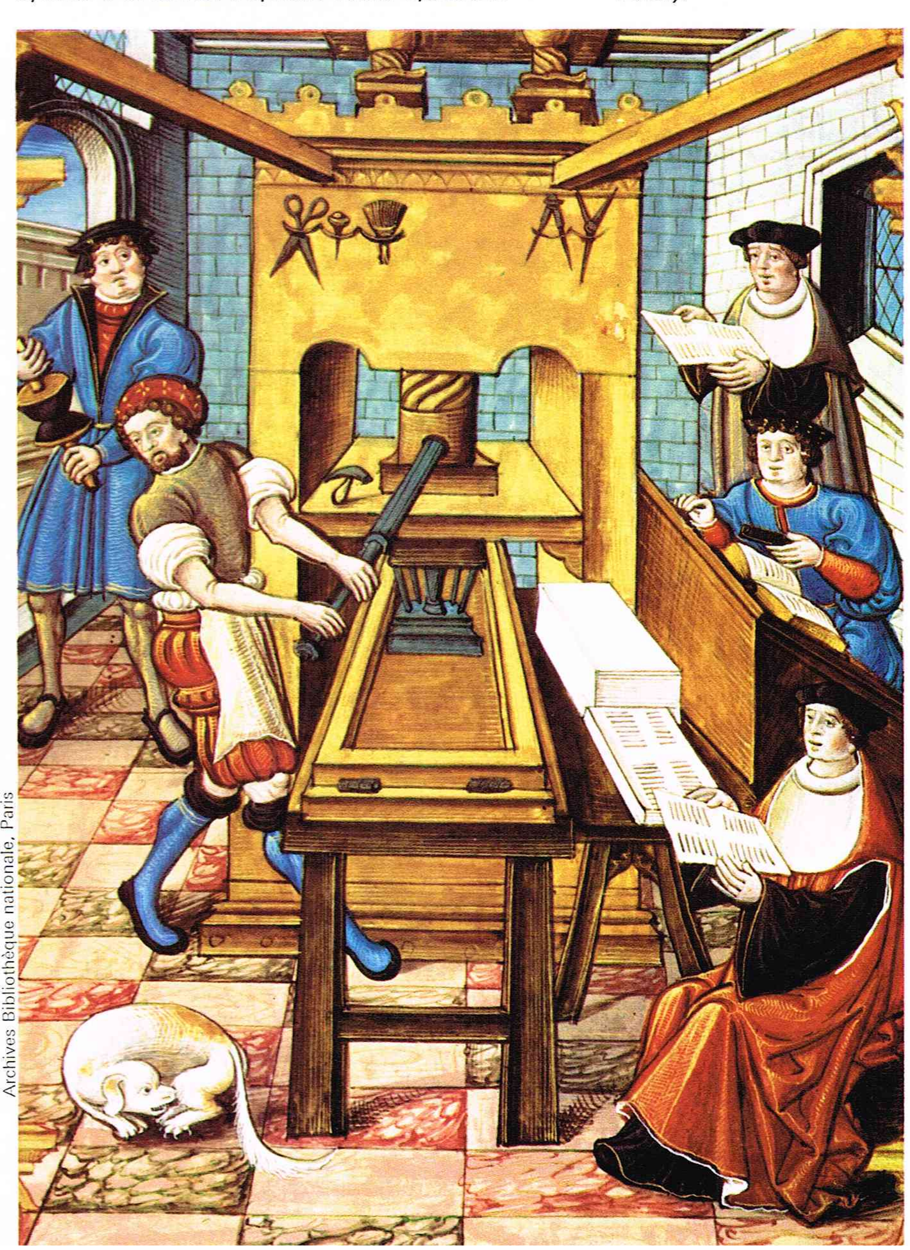
### *L'impression typographique*

La table où s'effectue le montage de la page a conservé son nom depuis l'époque de Gutenberg : c'est le « marbre », mot aujourd'hui bien impropre à désigner les vastes surfaces métalliques des ateliers. Le marbre ne sert plus qu'à la mise en forme, non à l'impression.

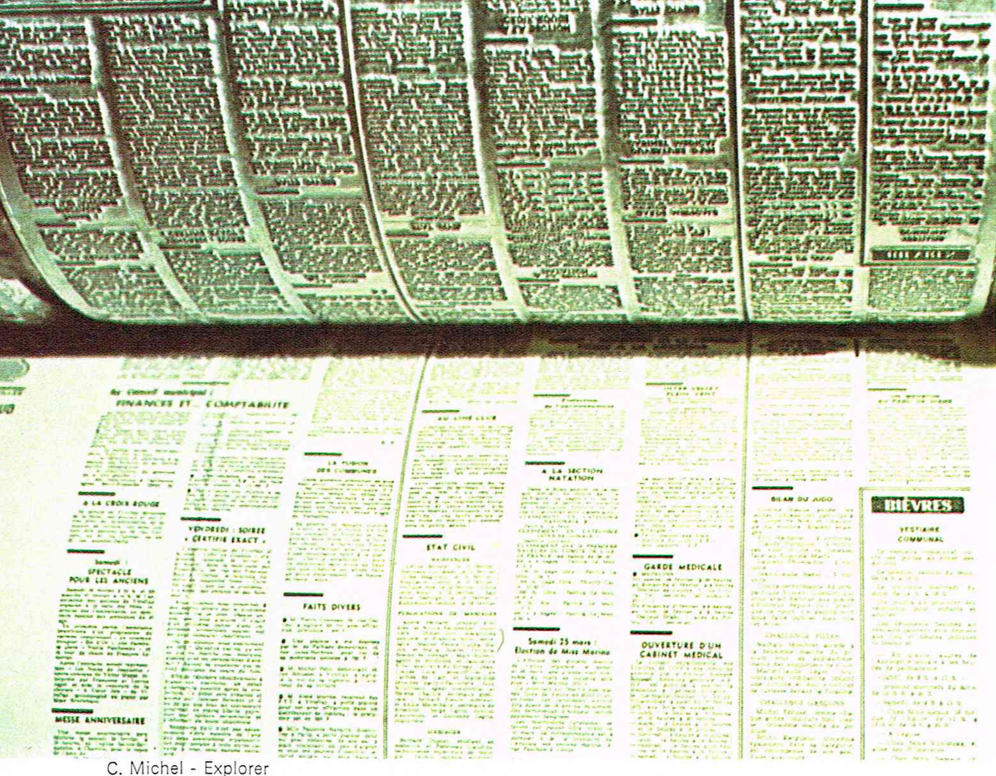
En revanche, la presse à bras de Gutenberg comporte, effectivement, au début, une plaque de marbre dont la surface, lisse et rigide, porte la forme imprimante, plane, encrée. La feuille de papier est appliquée et serrée par une vis à main descendant une platine comme un pressoir. Le papier, pris dans cet étau, reçoit l'encre. Le procédé n'est, évidemment, pas rapide (300 feuilles par jour). Il faut deux applications successives pour obtenir une bonne impression.

Le système « plan contre plan », dérivé de cette presse initiale, n'a connu qu'un développement relatif par rapport à deux procédés plus rapides : « plan contre cylindre » et surtout « cylindre contre cylindre ».

▼ *La presse à bras dans un atelier d'imprimerie du début du XVIe siècle (miniature du* Recueil des chants royaux, *Bibliothèque nationale, Paris).*



Archives Bibliothèque nationale, Paris




C. Michel - Explorer

E. Rousseau - Archives Snark

▲ *A gauche, l'impression typographique par le procédé « cylindre contre cylindre » : le cliché stéréo ou stéréotype ajusté sur le cylindre du haut permet l'impression du papier amené par le cylindre du dessous. A droite, une illustration du* **Petit Journal** *de 1901 relative à la machine rotative mise au point en 1866 par Marinoni pour ce même quotidien.*

**Le procédé « plan contre plan »**

Les perfectionnements décisifs du système d'impression « plan contre plan » n'interviennent qu'au XIXe siècle avec l'apparition de presses où platine et marbre, tous deux mobiles et montés sur un axe, se ferment l'un sur l'autre comme un livre.

L'effet d'inertie qui intervient à chaque période du mouvement alternatif a limité son utilisation à de petits formats (platine et forme moins lourde) et à des cadences qui ne sont nullement compatibles avec les exigences de la grande presse. Le développement de ce premier procédé est d'autant plus limité qu'apparaît le principe « plan contre cylindre ».

**Le procédé « plan contre cylindre »**

La forme est placée sur un plateau dont le va-et-vient latéral l'amène, successivement, sous les rouleaux encreurs, puis sous un cylindre tournant autour d'un axe fixe et portant la feuille de papier.

Les machines « plan contre cylindre » sont de deux types : dans les presses à arrêt de cylindre, ce dernier est stoppé au retour de la forme, un évidement du cylindre permettant le passage. Dans la machine à mouvement continu, le cylindre tourne sans arrêt. Il se soulève légèrement pour permettre le retour de la forme vers la prise d'encre (il fait alors deux tours dont un à vide), ou bien il comporte un évidement sur une partie de sa surface.

Outre ce changement de principe, les dispositifs d'impression connaissent des modifications de détail qui n'en apportent pas moins de sensibles améliorations de fonctionnement : c'est l'encrage, par des rouleaux superposés qui amènent l'encre de l'encrier jusqu'à la forme en permettant une égale répartition sur toute la surface ; c'est la mise au point d'un système de griffes qui plaquent la feuille de papier sur le cylindre de pression.

On met au point aussi la coordination, grâce à une crémaillère à double denture, de l'ensemble de la machine : plateau portant la forme, cylindre porte-papier, cylindres encreurs. Et, en 1814, l'Allemand Kœnig équipe le quotidien londonien *Times* de la première presse mécanique à vapeur permettant le tirage de 1 100 feuilles à l'heure.

**Le procédé « cylindre contre cylindre »**

Pour passer des quatre à cinq mille exemplaires par heure, autorisés par les procédés « plan contre plan » et « plan contre cylindre », aux dizaines, voire aux centaines de milliers de journaux imprimés dans l'espace d'une nuit, il est nécessaire de remplacer le mouvement alternatif, dont les effets d'inertie limitent la vitesse, par le mouvement circulaire continu, pour la forme imprimante comme pour le cylindre amenant le papier ; c'est le principe « cylindre contre cylindre ». Les machines de ce type sont connues sous le nom de *rotatives*.

Dès le XIXe siècle, on comprend le progrès qui pourrait être ainsi réalisé, d'autant plus que l'on connaît déjà la manière d'imprimer de la sorte les tissus.

★ *De la forme plane au cliché stéréo*

La difficulté réside dans la transformation de la forme de plomb, plane et rigide. Les premières tentatives consistent à fixer la forme sur un cylindre de grand diamètre en coinçant, entre les colonnes des pages, des filets en coin qui bloquent les lignes, présentant ainsi au papier une suite de facettes. Le papier, lui, est pressé par un autre cylindre de taille ordinaire, donc plus petit. Pour améliorer le rendement, on pense à placer, autour du gros cylindre, plusieurs petits cylindres : jusqu'à dix, qui permettent une cadence de vingt mille pages à l'heure (mais l'alimentation en papier pose à son tour des problèmes). Il suffit d'utiliser des bobines débitrices à la place des feuilles, en tenant compte que leur nombre est nécessairement limité.

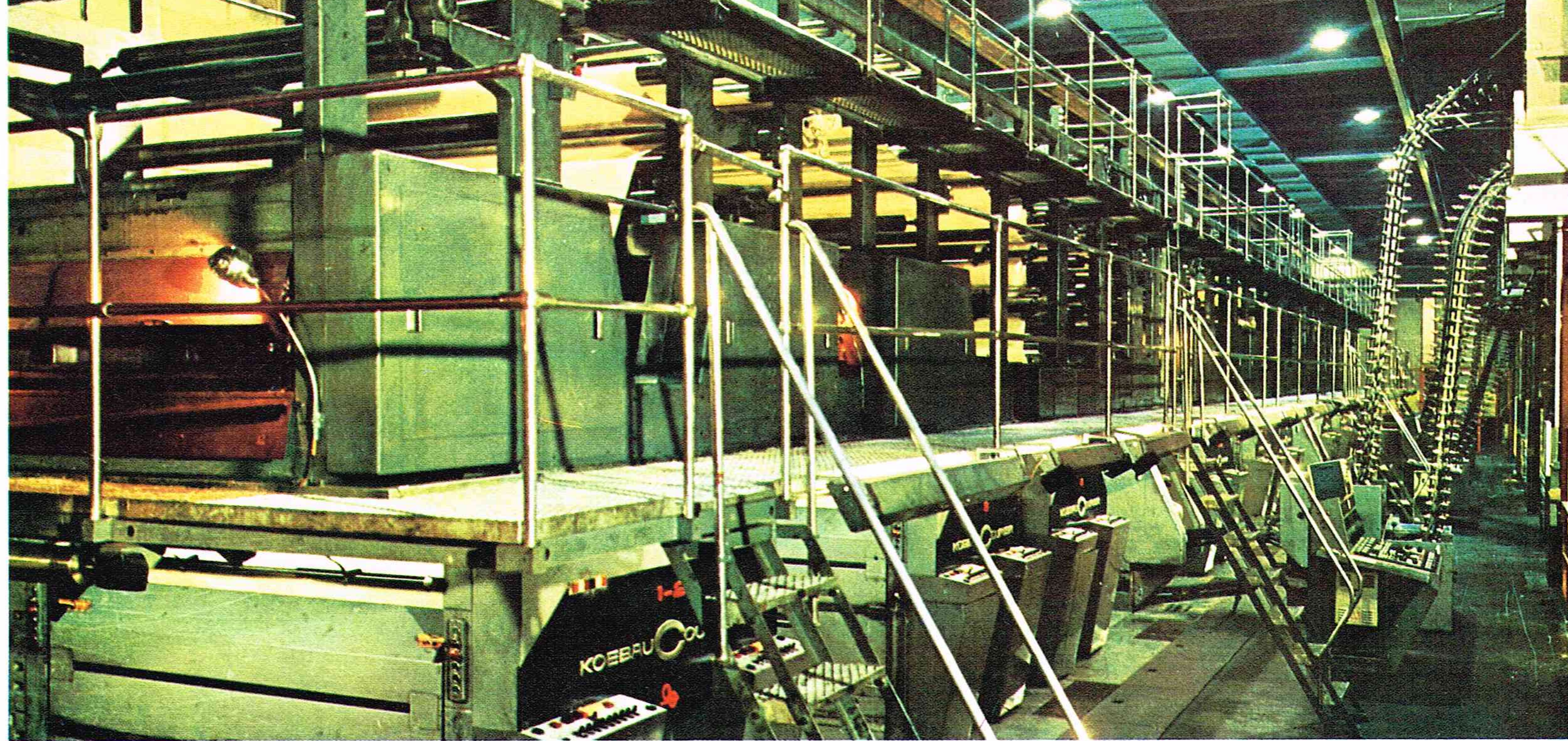
C'est la découverte d'un procédé permettant de passer de la forme plane à une autre, demi-cylindre, également en plomb, le cliché stéréo, qui permet le développement de la rotative « typo ». L'invention est utilisée pour la première fois par le *Times*, et le constructeur Marinoni met au point pour *Le Petit Journal* la première machine rotative française. Le passage d'une forme à l'autre nécessite un intermédiaire : le flan, feuille cartonnée, humidifiée, épaisse de quelques dizièmes de millimètres, qui prend l'empreinte de la page sous une forte pression.

Le texte de la page s'inscrit en creux dans le carton qui sert de moule à la forme demi-cylindrique. C'est de nouveau un alliage de plomb qui est injecté dans le creux. Nettoyé, mis au calibre, le cliché stéréo ainsi obtenu est ajusté sur le cylindre de la rotative.

★ *La rotative*

Notre description des différents principes d'impression suivait jusqu'ici, bien entendu, le traitement d'un seul exemplaire sur une seule face de la feuille. Le mécanisme est beaucoup plus complexe, qui permet de tirer, à la fois, toutes les pages d'un journal. La rotative prend alors des dimensions énormes.

Le papier, qui se dévide de bobines, est appliqué par le cylindre de pression sur le cliché, encré par une série de rouleaux, comme nous l'avons décrit précédemment. Le cylindre de pression est recouvert d'une garniture présentant une certaine élasticité. Sur les rotatives larges, on peut imprimer deux journaux à la fois : chaque cylindre porte, en largeur, les stéréos de quatre pages, réparties de manière à permettre l'impression par cahiers : la première à côté de la dernière, la deuxième à côté de l'avant-dernière, etc. ; l'ensemble de deux cylindres porte-clichés nécessaires à l'impression recto verso, alimenté par une bobine débitrice, constitue un *groupe*. L'importance d'une machine est proportionnelle au nombre de groupes, donc au nombre maximum de pages du journal.




T. Poggio

▲ *La rotative à cylindres servant à l'impression typographique du quotidien* **La Stampa** *à Turin; jusqu'à ces dernières années, le procédé typographique est resté le plus utilisé par la grande presse, et l'importance des équipements explique que l'édition des journaux soit l'apanage d'entreprises importantes.*

Les cylindres sont entraînés par des roulements à billes baignant dans l'huile de carters. Les différents groupes et les dispositifs de sortie : pliage, coupage, sont synchronisés. L'impression d'une deuxième couleur, nécessitant un passage supplémentaire, réduit d'autant la pagination. Les bandes des différents groupes sont superposées en sortie : le passage sur une molette coupante sépare les pages des deux exemplaires tirés simultanément. Chaque demi-bande est pliée dans le sens longitudinal, coupée par hauteur de journal, et dans le cas du grand format, le plus courant, pliée une nouvelle fois en hauteur. Dans cette présentation, les exemplaires sont prêts pour l'expédition : le plus souvent, un système de courroies, munies de pinces, achemine les exemplaires vers un atelier voisin en un impressionnant ruban, passant parfois au-dessus de la rotative. Ils y sont regroupés par paquets pour le transport. Dans le cas d'éditions successives, régionales par exemple, seuls les clichés des pages modifiées sont changés. Et les opérations de montage de clichés sont souvent plus longues que le tirage lui-même : sur une rotative double largeur, le rythme de 50 à 60 000 journaux à l'heure est facilement atteint. Sur ces modèles, le papier d'une largeur de 169,5 cm est dévidé en bobines de dix à onze kilomètres. Les bobines peuvent être changées sans que le rythme de production soit ralenti.

Dans le cas d'impression « en creux » (héliogravure) et non plus en relief, ou selon le procédé « à plat » offset, le système d'accrochage des formes circulaires diffère de celui des clichés typographiques. Mais les principes de fonctionnement de la machine rotative demeurent les mêmes.

L'impression typographique est demeurée, jusqu'à ces dernières années, le procédé le plus utilisé par la grande presse. Et la masse d'équipements nécessaires explique que l'édition de journaux soit l'apanage d'entreprises importantes.

La « Galaxie Gutenberg », comme l'appelle le philosophe Marshall McLuhan, est, pour lui, cette ère, à son déclin, où la conscience de l'homme a été structurée par l'écriture, par l'imprimerie. Sur le plan technologique, le nom de Gutenberg est associé à l'emploi du plomb. Et cette ère-là, aussi, est à son déclin, après un demi-millénaire.

## *La lumière*

Une autre invention est à l'origine de la nouvelle ère : celle de la photographie; l'utilisation de la lumière devient le principe de base, d'abord de l'illustration pour les textes au plomb — c'est la *photogravure* —; de la composition des textes — la *photocomposition* —; de la préparation des formes pour les nouveaux procédés d'impression héliogravure et offset, enfin pour les techniques de reproduction en nombre limité d'exemplaires — la *photocopie*.

### *La photogravure*
### L'illustration des textes typographiques

L'utilisation des caractères moulés a relayé, on l'a vu, le procédé de xylographie pour l'impression des textes. En revanche, la plaque gravée demeure, jusqu'au XIXe siècle, la seule possibilité d'illustration par impression typographique : les plaques de bois en relief sont incluses dans les formes. Mais le bois s'use vite; et la préparation est longue. La multiplication des exemplaires entraîne donc l'utilisation d'un autre matériau, le métal. Firmin Gillot, un graveur précisément, pense que la meilleure manière de dégager de larges surfaces métalliques avec un contrôle continu de la réaction consiste à utiliser un acide. Les parties qui doivent demeurer en relief sont protégées de la morsure par un vernis dont on recouvre le dessin.

L'application des découvertes de Niepce et Daguerre transforme ce procédé, manuel et encore rudimentaire, en ce qui devient la photogravure.

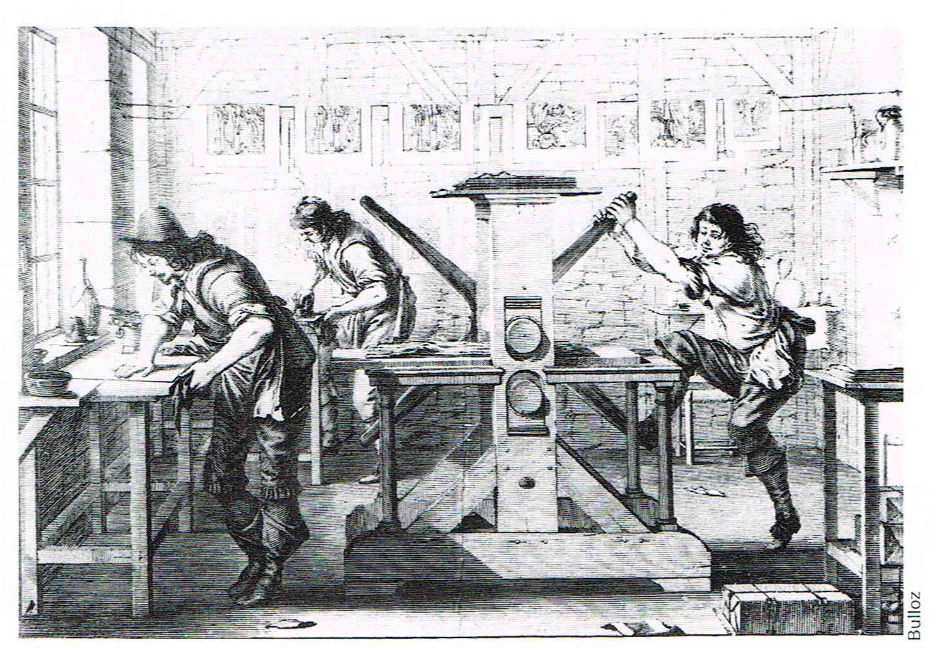
Le principe de la photographie : la réaction de certaines substances à la lumière, est utilisé deux fois de suite. La première opération consiste simplement en une photographie du document à reproduire : le banc de reproduction permet l'agrandissement ou la diminution. Le négatif ainsi obtenu sur plaque de verre ou sur film est identique à ceux que réalisent les photographes. Il doit être développé. Au cours du passage au « révélateur », les sels d'argent (bromures, iodures, chlorures) transformés par l'exposition à la lumière apparaissent en sombre là où le document original est clair, et réciproquement. Le « fixateur » immobilise la réaction. La seconde opération fait passer l'image sur la plaque métallique (zinc). Celle-ci est recouverte d'une fine couche colloïdale (gélatine contenant des bichromates alcalins) qui possède la propriété de durcir et de devenir insoluble sous l'action de la lumière.

Le négatif obtenu lors de la première opération est placé au contact de la plaque, qui est insolée. Les parties claires du négatif laissent passer la lumière, et la gélatine réagit; les parties opaques arrêtent le faisceau, et la couche demeure fragile. La plaque est passée à l'eau, et la solution disparaît, laissant le métal à nu là où elle n'a pas durci sous l'action de la lumière. Le zinc est ensuite trempé dans un bain acide. Il est attaqué dans les zones où il n'est pas protégé par la gélatine, et le tracé se dégage en relief, prêt pour l'encrage. Le document original est ainsi restitué.

Ce procédé est valable pour rendre les blancs et les noirs. Pour représenter les teintes grises plus ou moins soutenues, le dessin original doit comporter des hachures plus ou moins serrées — ce type de plaque est appelé *cliché au trait*.

### La reproduction des photographies

Mais ce procédé ne peut permettre sans aménagement la reproduction d'une photographie avec ses nuances,




▲ ***Atelier d'imprimerie des planches en taille-douce ; à l'inverse du procédé typographique, ce sont les parties en creux de la forme en cuivre qui reçoivent l'encre (musée Carnavalet).***

ses ombres, essentielles pour la restitution du document. Il faut utiliser une technique intermédiaire, découverte en 1850 par l'Américain Ives : la trame. Il s'agit d'une grille aux traits opaques, au réseau très fin, qui est intercalée, lors de l'exposition du négatif, entre l'original et la surface photosensible. La trame découpe le négatif en petits carreaux. Lors de la photographie sur le négatif, les surfaces blanches de l'original, qui réfléchissent fortement la lumière, inscrivent nettement les contours de la grille, les surfaces noires ombrent les formes de la trame, et les teintes intermédiaires rendent la surface du négatif plus ou moins obscure entre les points. Sur le zinc, les gris sont restitués par la densité plus ou moins grande des surfaces en relief : les foncés reçoivent plus d'encre que les clairs. Après impression, le pouvoir séparateur de l'œil n'est pas suffisant pour distinguer la multitude des points de la photographie restituée. Le cliché ainsi obtenu par l'intermédiaire d'une trame prend le nom de similigravure ou *simili*.

Lors du montage de la page, les clichés de zinc, représentant dessins ou photographies, sont intercalés parmi les textes. Pour l'impression sur rotatives typographiques, leur relief est imprimé dans le flan comme celui des caractères de plomb. Il apparaît sur le cliché demi-cylindrique placé sur la rotative.

### *Le procédé d'impression en « héliogravure »*

L'utilisation de la lumière pour la gravure du métal, comme en photogravure, permet l'utilisation industrielle de procédés très anciens d'impression « en creux » : la « taille-douce » et l' « eau-forte ». Le principe est exactement inverse de celui de l'impression typographique : ce sont les parties en creux de la forme qui reçoivent l'encre. La taille-douce exige l'emploi d'un burin pour la gravure de la forme en cuivre. L'eau-forte reprend le procédé de gravure par acide de Firmin Gillot avec cette différence que les parties protégées par le vernis sont, cette fois, celles qui n'apparaissent pas à l'impression.

La rotative en héliogravure comporte des cylindres recouverts de cuivre, gravés, qui constituent les formes. Le cylindre baigne dans un bac à encre où s'emplissent les creux, et une languette râcle la forme afin d'éliminer l'encre des parties en relief. Le papier, fortement appliqué sur la forme, reçoit l'encre qui se diffuse comme dans un buvard, donnant une impression de qualité supérieure à celle de la typographie.

L'utilisation des gélatines employées en photogravure a permis de développer l'héliogravure : la gravure au burin des cylindres de cuivre restreignait auparavant son utilisation. Mais un aménagement du procédé a été nécessaire pour deux raisons : l'application régulière de la substance colloïdale sur un cylindre est malaisée, et, sur un cylindre, une surface importante légèrement creuse ne peut conserver l'encre. L'utilisation de la trame et d'un papier support permet de résoudre ces problèmes. La préparation du cylindre de cuivre s'effectue, en effet, par l'intermédiaire d'un « papier charbon » comportant une gélatine photosensible qui subit deux insolations successives :

— la première à travers une trame dont, cette fois, les traits sont transparents, alors que les carreaux sont opaques. Cette exposition durcit, dans l'épaisseur de la couche sensible, un treillis insoluble qui, plus tard, lors de l'attaque du cylindre par l'acide, dessine dans le cuivre des alvéoles réguliers d'où l'encre ne peut s'échapper ;

— la seconde insolation de la couche sensible s'effectue à travers un « positif » transparent des documents à reproduire : photos, non tramées cette fois, textes écrits en positif sur le film, obtenus soit en photocomposition, soit en tirant une épreuve des textes au plomb, sur une feuille de papier cellophane. La lumière qui traverse le positif durcit plus ou moins l'intérieur des cheminées dessinées par la trame : les parties noires du document correspondent aux zones non insolées, les gris durcissent plus ou moins profondément la couche. Le papier charbon est appliqué sur le cylindre, la gélatine au contact du métal qu'elle recouvre. Papier et solution non durcie partent à l'eau chaude.

Après délimitation exacte des surfaces à imprimer par un bitume protecteur, dont on recouvre les marges, commence la gravure proprement dite. Le graveur verse sur le cylindre une solution acide dont il peut modifier la concentration. L'acide élimine progressivement la gélatine et attaque le métal plus ou moins rapidement, en fonction de la couche qui subsiste. Il creuse des alvéoles plus ou moins profonds correspondant aux différentes nuances : les creux les plus importants atteignent 3 à 4 centièmes de millimètre. La profondeur des alvéoles détermine la quantité d'encre qui y pénètre, donc l'intensité des couleurs.

Le cylindre est monté sur la rotative dont la structure diffère un peu de celle du procédé typographique : la prise d'encre surtout. La constitution en groupes est la même, mais le papier est fortement pressé sur la forme, ce qui lui permet de recueillir une encre très fluide, qui exige un séchage en sortie de cylindre. Après utilisation, le cylindre est regarni de cuivre par un procédé électrolytique.

La longue préparation des cylindres et les opérations successives limitent l'utilisation de l'héliogravure à un secteur de la presse, les périodiques, où la qualité d'impression prend plus d'importance que la rapidité d'exécution. Ainsi, l'impression de textes par l'héliogravure n'est pas compétitive par rapport aux autres procédés. En revanche, cette technique est employée en particulier pour revues et magazines aux illustrations nombreuses et de qualité soignée.

### *La photocomposition*

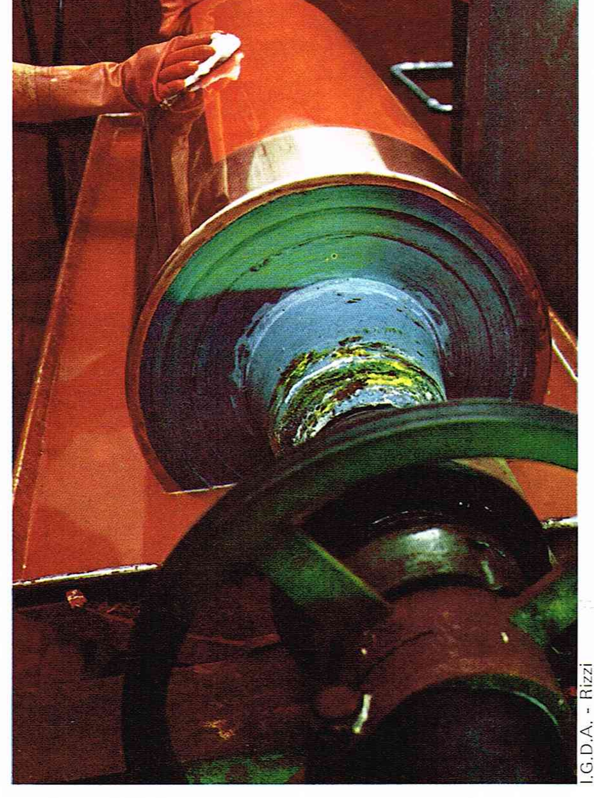
La photocomposition est le procédé qui consiste à envoyer sur un papier sensible l'image des caractères composant les mots. Dès 1890, un Anglais, Friese Green, entreprend des recherches sur les moyens de composer des textes photographiquement, mais c'est en 1956 seulement qu'apparaissent sur le marché les premières photocomposeuses.

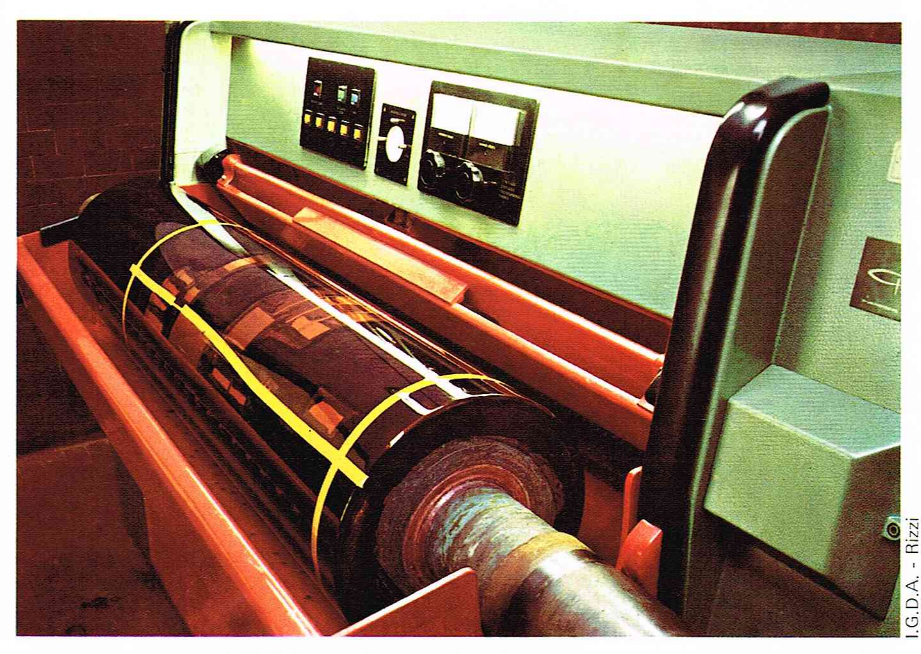
En fait, la photocomposition doit son développement à l'utilisation, en aval, de moyens d'impression qui permettent eux aussi la reproduction des textes par le procédé photographique, l'offset surtout.

L'invention de la photogravure permet déjà la reproduction de textes sans l'intermédiaire de la composition typographique, car ils sont alors traités comme des clichés au trait. Mais, la plupart du temps, l'abandon du procédé typographique pour la composition s'accompagne de la réforme du matériel d'impression.

#### La frappe directe

La photocomposition est une forme de composition froide, par opposition à la composition chaude (au plomb) ; elle n'est pas la seule. La frappe directe sur papier, ou sur un support translucide, par une simple machine à écrire, en est une autre. De nombreuses publications : journaux d'associations, polycopiés, circulaires, sont ainsi éditées.




Les professionnels de l'imprimerie en ont perfectionné le système, pour permettre la justification. Les machines « Varityper », « Multipoint »... sont équipées d'un clavier de machine à écrire. Elles utilisent la double frappe directe. L'opérateur tape son texte une première fois. En fin de ligne, un dispositif l'avertit qu'il lui faut éventuellement couper un mot. La deuxième frappe permet la répartition des espaces entre les mots. Le système est long, difficilement compatible avec les exigences de la presse.

En revanche, les modèles les plus récents de machines à écrire, assistées par informatique, sont utilisables par les petits journaux... en même temps qu'ils amènent une révolution dans le domaine du secrétariat.

**La « Lumitype »**

Dans la grande presse, c'est la photocomposition qui amène une révolution. Si la composition typographique a progressé sensiblement avec l'introduction de l'automatisation et de l'électronique, son évolution est sans commune mesure avec celle qu'a connue, en vingt années seulement, le procédé présenté pour la première fois en 1956 avec la « Lumitype 200 », œuvre des ingénieurs français René Higonnet et Louis Moyroud.

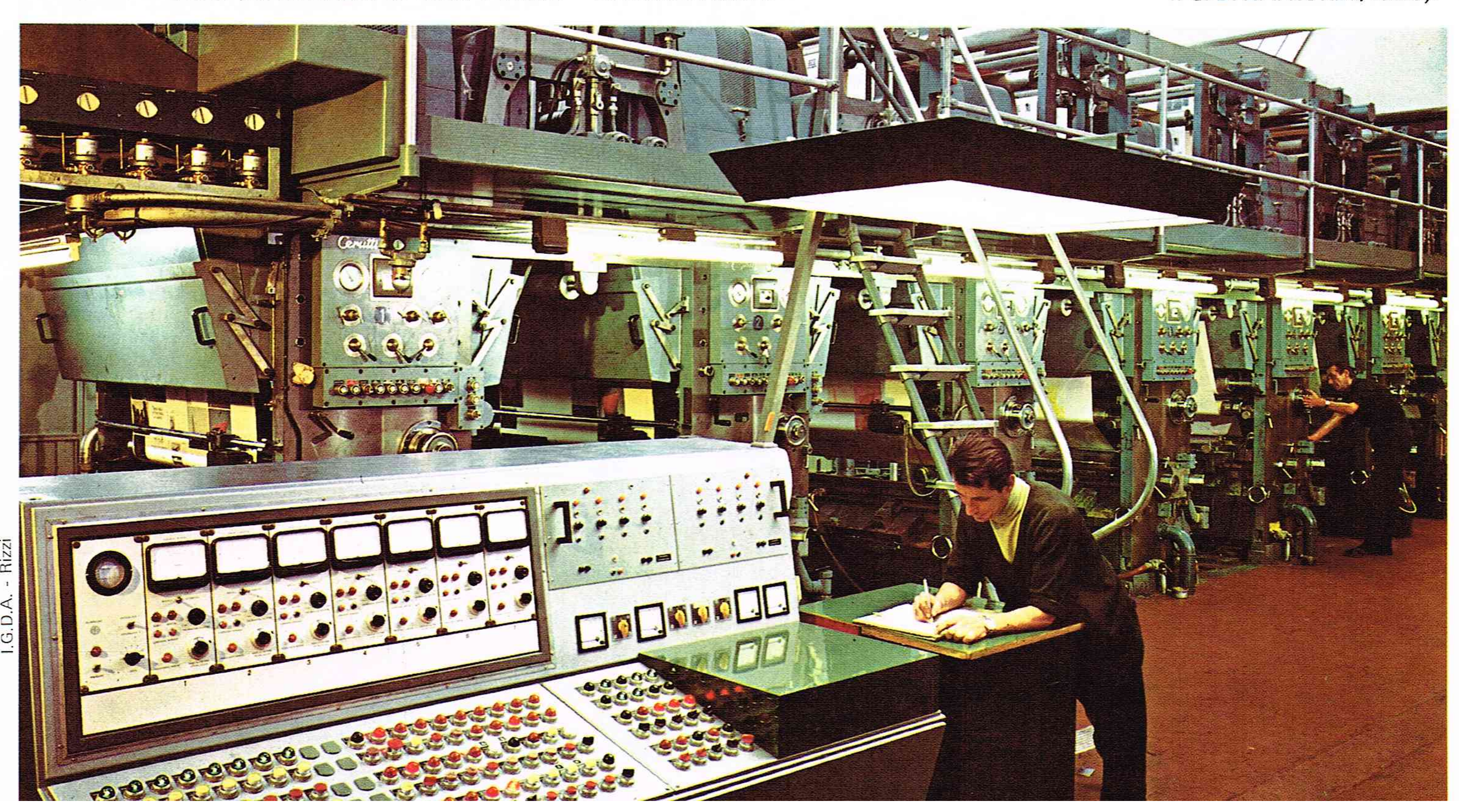
Le principe en est le suivant : un flash au xénon envoie, vers un papier photosensible, un éclair, à travers un disque matrice opaque sur lequel se découpent les caractères. Le disque tourne à la vitesse d'environ 1 800 tours par minute. L'éclair du flash est déclenché au moment où le caractère à imprimer passe devant un objectif, ou zoom, qui donne à la lettre la grosseur demandée. L'image du caractère est projetée vers un prisme qui la renvoie sur un papier sensible. Le prisme avance d'un cran à chaque commande, composant ainsi la ligne. Un système d'entraînement du papier sensible permet de passer de ligne en ligne.

En amont de cette unité photographique, qui constitue l'innovation de la machine, un opérateur frappe le texte sur un clavier. Il obtient un exemplaire de contrôle, mais la copie est enregistrée par un calculateur qui additionne les chasses (largeurs) des différents caractères. L'opérateur décide de la coupure de mot en fin de ligne. Le passage à la suivante déclenche la commande du calculateur qui répartit les espaces entre les mots et déclenche le fonctionnement de l'unité photographique.

Les premiers perfectionnements apportés sont d'ordre mécanique : le disque matrice tourne plus rapidement. Il comporte des alphabets concentriques, puis quatre alphabets sur chaque circonférence. Sur certains modèles, le disque est remplacé par un cylindre, le flash se trouvant au centre.

▲ ***Deux étapes de l'impression en héliogravure** : à gauche, le cylindre de cuivre recouvert de papier charbon à la gélatine préalablement insolée est nettoyé à l'eau chaude qui élimine le papier et la gélatine non durcie ; à droite, dans une étape ultérieure, le cylindre est placé dans une machine qui verse de l'acide, lequel enlève la gélatine restante et creuse le cylindre.*

▼ ***Une rotative à cylindres** pour l'héliogravure ; cette machine comprend huit éléments ; le pupitre visible au premier plan contrôle électroniquement la tension du ruban de papier et la viscosité de l'encre (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*





I.G.D.A. - Rizzi

▲ ***Utilisation d'une* photocomposeuse Diatype *(Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).***

En même temps, la commande directe par l'opérateur est abandonnée. Le clavier est déconnecté. Les instructions et le texte sont enregistrés sur une bande perforée ou dans la mémoire d'un ordinateur : car l'imprimerie n'a pas échappé au développement de l'informatique. Pour la commande automatisée des linotypes déjà, des programmes de coupures de mots ont été mis au point, qui gèrent la justification. En photocomposition, le claviste entre en mémoire le texte « au kilomètre ». L'ordinateur se charge d'adresser ensuite à la photocomposeuse les indications pour que le texte sorte justifié. Le rythme atteint pour certaines de ces machines 300 à 400 000 caractères à l'heure.

### Les photocomposeuses à tube cathodique

L'étape suivante, en matière d'innovation, consiste à remplacer les éléments mécaniques de la photocomposeuse par l'électronique — et ce procédé permet toutes les fantaisies. C'est un tube cathodique qui remplace flash et disque matrice. Le traitement du signal électronique permet de faire varier la chasse du caractère, sa graisse, et même éventuellement de le déformer : on peut ainsi obtenir un « italique électronique ».

Certaines de ces photocomposeuses atteignent la cadence de 10 millions de caractères à l'heure, 5 000 lignes journal à la minute.

Enfin, il existe sur le marché un certain nombre de lecteurs optiques remplaçant l'introduction des textes par clavier. La copie de la rédaction, qui doit respecter quelques règles de présentation, est analysée par une tête de lecture sur certains modèles, par un rayon laser sur d'autres. La reconnaissance de lecture s'opère par analyse du trait ou par la « meilleure concordance » entre le signe présenté et les indications en mémoire. La vitesse de lecture va de 100 à 1 000 corps par seconde avec un taux d'erreur de l'ordre de 0,00001. Les caractères digitalisés (c'est-à-dire traduits en langage binaire) sont envoyés sur tube cathodique pour être photocomposés.

### Une nouvelle ère

L'introduction de la photocomposition, mais surtout de l'informatique, dans une entreprise de presse bouleverse complètement le travail des différents corps de métier.

En amont de la composition, les innovations nécessitent des changements d'habitudes. En publicité, par exemple, les petites annonces, introduites au fur et à mesure en mémoire, sortent classées, et on peut même accorder la priorité aux clients les plus assidus. Dans le même temps, le calculateur peut assurer la facturation immédiate.

Dans le cas de l'utilisation de moniteur vidéo, la rédaction, voire un bureau détaché s'il est équipé d'un terminal, peut contrôler son texte, le corriger avant la composition. Le secrétariat de rédaction peut prévoir des blancs lors de la composition, jouer avec différents caractères.

L'atelier ressemble plus à un laboratoire qu'aux salles des anciennes linotypes où le cliquetis des matrices, la chaleur moite du plomb fondu créaient une ambiance très particulière. L'introduction des textes « au kilomètre » a réduit le nombre de clavistes à quelques-uns, encore moins, bien sûr, dans le cas de lecteurs optiques. Aussi les linotypistes qualifiés, hier indispensables, risquent d'être remplacés par des dactylographes sans spécialité.

L'information, stockée sur disque ou bande magnétique, est codée selon sa page de destination. Elle est corrigée et éditée sur écran cathodique sans aucune manipulation. Tous les ordres sont donnés à partir des pupitres. Une seule photocomposeuse moderne suffit à la sortie des textes d'un journal, et si les entreprises sont, en général, équipées de deux machines semblables, c'est plus par sécurité, en cas de panne, que pour augmenter la capacité. A la commande, la photocomposeuse sort les textes d'une même page. Ils peuvent être imprimés sur papier ou directement sur film transparent. La largeur de sortie dépend du type de machine : une ou plusieurs colonnes du journal.

Le montage de la page s'effectue aux ciseaux et à la colle, avec l'aide d'une table lumineuse dans le cas de films transparents. Avec les premières photocomposeuses, c'est une opération délicate : la correction exige le découpage de la ligne présentant la faute et son remplacement, les blancs sont répartis dans la page, et ces collages minutieux exigent beaucoup de temps.

Avec les photocomposeuses à écran cathodique, en revanche, le montage est réduit au minimum : la disposition des blancs, les corrections sont intervenues avant l'envoi à la composition. Il suffit de coller les bandes, placer les photos (traitées par ailleurs) avant l'envoi de la page complète à la photogravure.

Sur les modèles d'avant-garde, la mise en page elle-même peut être informatisée : l'opérateur, qui entre le texte en mémoire, indique sa place dans la page. La largeur de sortie du texte est celle du format de la page : un « tabloïd » (petit format) sort en quarante secondes.

Un groupe de presse japonais, le premier au monde, a réussi, en 1976, à informatiser totalement les opérations de composition et de mise en page de ses journaux. Son système permet la composition et la mise en page de trente pages à l'heure, tout en prévoyant, par exemple, l'incorporation de nouvelles de dernière heure. Ces pages sont écrites en japonais dont les caractères étaient, jusqu'à présent, réputés impropres au traitement par ordinateur.

L'invention récente de la photocomposition et les formidables innovations qu'elle a subies en quelques années expliquent que les divers types de machines soient en service dans les entreprises de presse. Le choix d'un matériel qui se démode aussi rapidement est particulièrement délicat pour une entreprise moyenne. Son coût risque de précipiter concentrations et regroupements, au moins au niveau de l'élaboration technique.

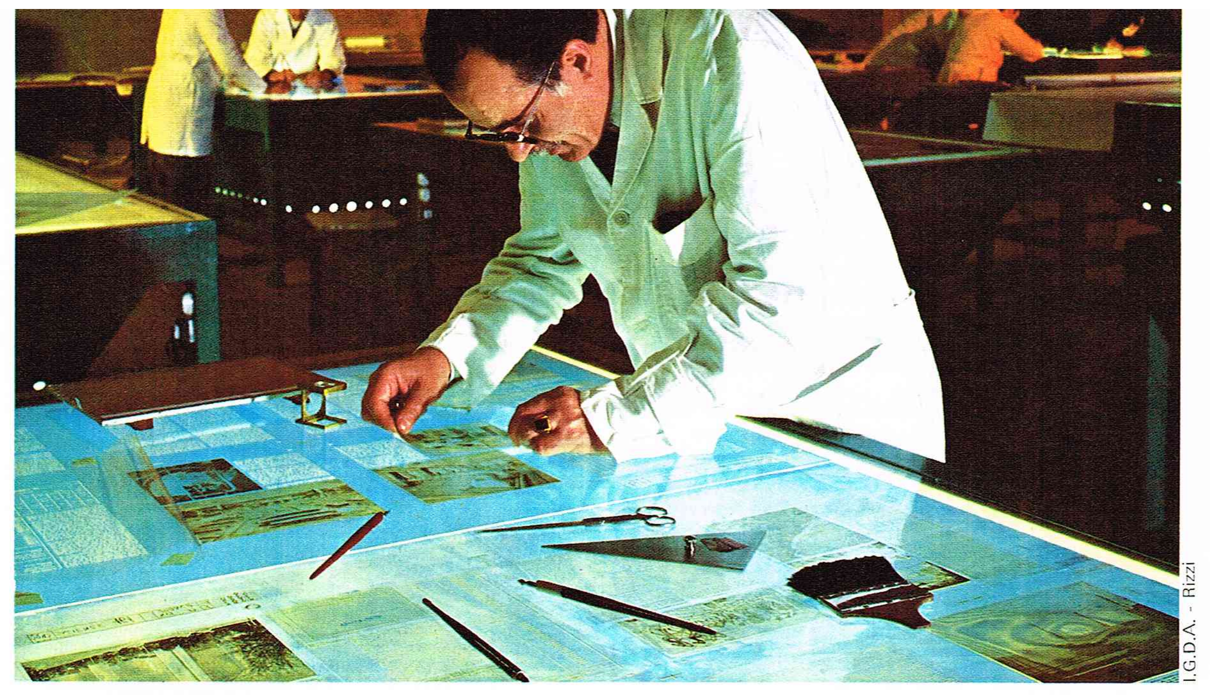
L'introduction de l'informatique dans le domaine de la presse amène, en outre, les mêmes bouleversements que dans tous les secteurs d'activité en permettant le stockage des informations, la gestion informatisée des fichiers d'archives et la transmission des éléments par télé-informatique. Enfin, l'adoption de l'ordinateur pour le traitement des textes s'accompagne, le plus souvent, de son introduction dans la gestion de l'entreprise.

## *L'impression par le procédé « offset »*

Alors que l'impression typographique et l'héliogravure utilisent un procédé physique, en relief ou en creux, l'offset, dérivé de la lithographie, fait appel aux caractéristiques chimiques de certains corps : la répulsion entre l'eau et les matières grasses.

### La lithographie

C'est à un artiste bavarois, Aloys Senefelder, que l'on doit la découverte de la lithographie à la fin du XVIIIe siècle. Voulant imprimer ses œuvres, et n'ayant pas les moyens financiers de recourir à la typographie, il a l'idée de graver la pierre calcaire de son pays. C'est lors du lavage qu'il s'aperçoit de la répulsion entre l'eau et l'encre sur cette pierre. Il songe alors à utiliser cette caractéristique et renonce à la gravure. Il dessine un motif à l'encre grasse, écrit son texte sur la pierre. Puis il mouille cette dernière : à l'endroit des traits, l'eau ne peut se fixer; en revanche, partout ailleurs, elle s'incruste. Et, au passage du rouleau encreur, c'est le contraire : l'eau repousse l'encre; seuls les traits l'acceptent. L'application du



I.G.D.A. - Rizzi

◀ *Dans le* procédé offset, *la page est constituée de films transparents comprenant des photos tramées et des textes frappés directement par la photocomposeuse ou rephotographiés après montage. La technique consiste ensuite à reporter sur une feuille métallique recouverte de substance sensible à la lumière (la* plaque offset*) l'image de la page montée (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

papier donne de bons résultats. Le principe de la lithographie est découvert.

Il reste à la mécaniser, et on applique le procédé classique plan contre plan, puis plan contre cylindre (voir les paragraphes sur l'impression typographique). En même temps, on découvre que le zinc (d'une utilisation plus aisée) présente les mêmes caractéristiques que la pierre. Et comme une feuille de zinc s'enroule autour d'un cylindre, on peut utiliser ce nouveau procédé sur la presse rotative, à condition de prévoir, en plus des rouleaux encreurs, des rouleaux « mouilleurs ».

### L'offset

Mais le procédé offset résulte d'une autre découverte, d'ailleurs tout à fait fortuite. En 1904, dans une imprimerie américaine, une machine, du type de celle décrite ci-dessus, tourne à vide, sans papier, si bien que l'encre se transfère sur le cylindre de pression, recouvert de caoutchouc. Lorsque l'on remet du papier, il s'imprime recto verso bien entendu, mais la qualité est meilleure du côté du caoutchouc, phénomène qui s'explique par la structure microscopique du papier : le cylindre métallique n'atteint que les « reliefs » du papier, alors que le caoutchouc fait corps avec lui. Ainsi naît le procédé « offset », mot anglais où intervient la notion de report, de décalque. Il comprend un cylindre supplémentaire entre le cylindre qui porte la plaque et le cylindre de pression : c'est le *blanchet*, qui reporte l'encre de la plaque sur le papier. Ce blanchet peut apporter une simplification du groupe rotative : c'est le principe « blanchet contre blanchet », où chacun des rouleaux de caoutchouc agit comme un cylindre de pression vis-à-vis de l'autre.

### La préparation de la plaque offset

La préparation de la plaque offset consiste à reporter sur une feuille métallique (zinc ou aluminium) l'image de la page montée. Le film photographique constitue l'intermédiaire, comme pour la photogravure; on parle d'ailleurs de « photogravure offset », bien que la notion de gravure soit ici bien imparfaite.

La page est constituée de films transparents : photos tramées et textes frappés directement par la photocomposeuse ou rephotographiés après montage. Des retouches sont apportées sur le film afin d'éviter les taches produites par les inévitables défauts. C'est encore par insolation que sont déterminées sur la plaque métallique les zones de rétention d'encre et les zones « hydrophiles ».

Le premier procédé, jugé aujourd'hui imparfait, ne permet pas les tirages au-delà de 30 000 exemplaires. La plaque métallique est recouverte d'une fine couche colloïdale, sensible à la lumière. Elle est exposée à la lumière au contact de la page en négatif : les parties claires du document, et notamment les textes, laissent passer les rayons, et la gélatine durcit aux endroits à imprimer. La couche non durcie disparaît à l'eau; le métal, préalablement traité, est hydrophile; le revêtement colloïdal est oléophile, mais hydrofuge. L'inconvénient est que la couche durcie forme une très légère saillie qui s'use à l'impression, ne permettant que des tirages limités.

C'est la raison pour laquelle le procédé dit offset « en creux » est plus utilisé. La page à reproduire est cette fois positive et, lors de l'insolation, la couche durcie protège les parties non imprimantes tandis que l'eau laisse le zinc à nu. Le passage dans une solution légèrement acide accentue le creux. La plaque reçoit un revêtement gras qui recouvre l'ensemble. Un nouveau décapage permet de faire disparaître le colloïde durci : le zinc hydrophile apparaît donc à nu aux endroits non imprimants, tandis que la couche grasse reçoit l'encre dans les « creux », d'ailleurs tout à fait relatifs puisque de l'ordre de 5 millièmes de millimètre (contre 4 à 5 centièmes en héliogravure).

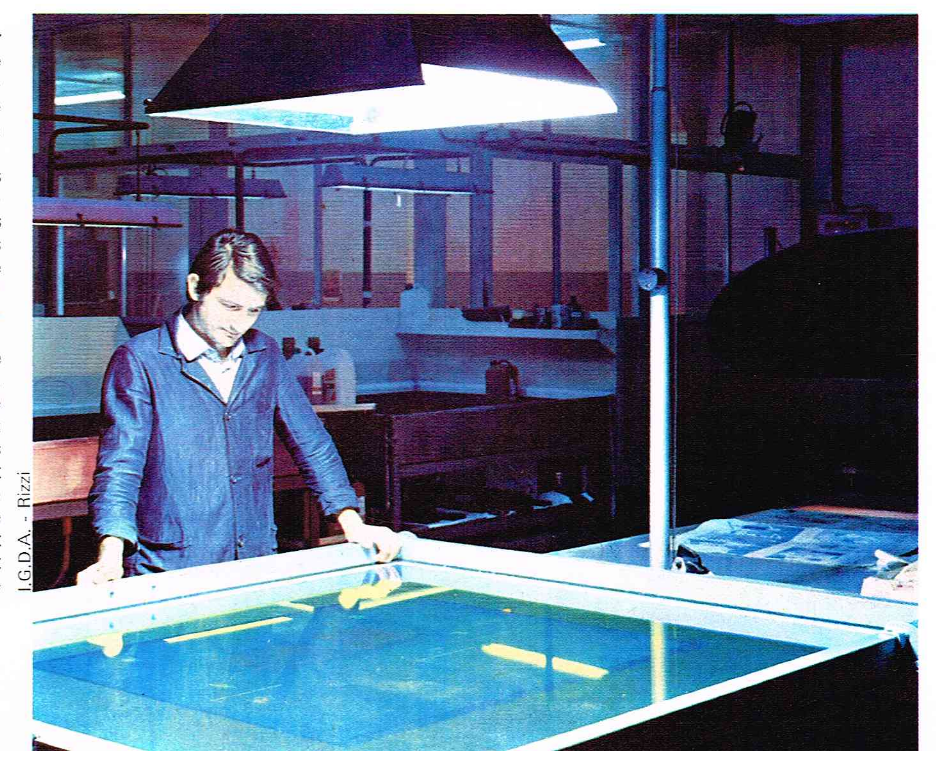
Ces plaques plus résistantes sont elles-mêmes dépassées par l'utilisation d'autres plaques, « multimétalliques », faites de plusieurs pellicules superposées de métaux hydrophiles en surface, et hydrofuges au-dessous. La préparation de la plaque par les méthodes décrites ci-dessus consiste à faire disparaître la première couche aux endroits à imprimer.

### Le développement de l'offset

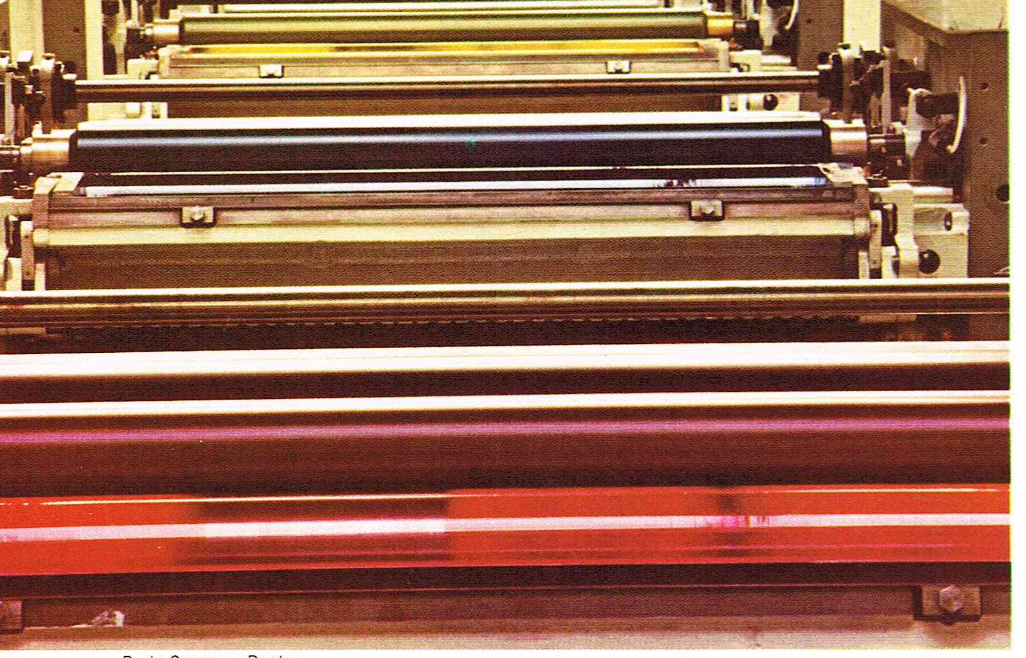
Le procédé offset ne commence à prendre de l'importance dans la grande presse que depuis quelques années; le temps exigé par la préparation des plaques, les tirages limités font hésiter les responsables de journaux. Jusqu'aux années 60, on achète des rotatives typo.

Aujourd'hui, l'offset a acquis ses lettres de noblesse, en particulier pour l'impression de la couleur : certains montages planétaires permettent l'impression simultanée de quatre couleurs avec un cylindre unique de pression.

▼ *Exposition d'une plaque offset à la lumière d'une lampe au xénon (Imprimerie I. G. D. A. à Novara, Italie).*

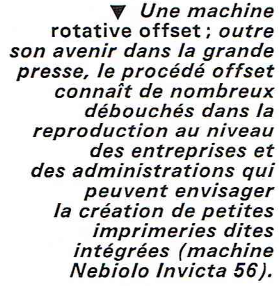


I.G.D.A. - Rizzi



R. de Seynes - Rapho

▲ *L'impression chromatique selon les différentes techniques d'imprimerie relève d'un principe simple : il faut toujours un passage par couleur ; il en est de même pour la reproduction des photographies en couleurs, la juxtaposition des couleurs successives restituant l'original.*



Les innovations techniques apportées par le développement de l'offset connaissent des prolongements pour la modification du procédé typographique dans certains ateliers. L'utilisation de la plaque enveloppant le cylindre est une possibilité : elle supprime le lourd cliché stéréo de plomb et semble plus compatible avec la photocomposition. Dans ce dernier cas, en effet, il est nécessaire d'utiliser un procédé identique à celui de la photogravure : des plaques plastiques en relief de très grande résistance sont accrochées directement sur les cylindres ou supportent la prise d'empreinte du flan. L'intermédiaire du blanchet est également apparu sur certaines machines dites « type offset », le cylindre de plomb se déchargeant de son encre sur un rouleau de caoutchouc. La technique du blanchet contre blanchet est utilisable, simplifiant la structure de la machine et évitant le mouillage préalable.

Mais le procédé offset, outre son avenir dans la grande presse, connaît de très sûrs débouchés dans un autre monde, celui de la petite reproduction. La simplification qu'il apporte pour reproduire les textes dactylographiés, en particulier, lui ouvre des portes, fermées jusqu'alors aux trop lourds procédés typographiques et d'héliogravure : celles des administrations et des entreprises qui peuvent envisager la création de petites imprimeries dites intégrées, et même celles... des bureaux.

### *La reproduction des couleurs*

L'impression de couleur selon les différents procédés, typographie, héliogravure, offset, relève d'un principe simple : il faut un passage par couleur. Une page de journal éditée en typo, par exemple, et présentant un titre et quelques filets rouges en plus du texte et des photos noirs reçoit, sur un premier cylindre, texte et photos, sur un second les parties rouges. Trois couleurs exigent trois passages, et ainsi de suite, les seules difficultés étant, d'une part, la précision du repérage pour le montage des clichés sur le cylindre et, d'autre part, la pagination réduite par l'immobilisation des cylindres.

Notons au passage que l'impression en « aplat », d'une couleur, sur une page, ne laissant apparaître que quelques parties blanches « en réserve », donne une possibilité supplémentaire.

Chaque passage de couleur exige donc un cliché particulier. Le principe est le même pour l'impression des photographies en couleurs, la juxtaposition des couleurs successives restituant l'original.

## *La transmission en fac-similé*

La transmission des pages de journal par ligne téléphonique est une technique utilisée depuis peu en France, mais qui fonctionne déjà dans d'autres pays. C'est un procédé que la presse connaît depuis bien longtemps avec la transmission des photographies par *bélinographe*.

L'épreuve composée, par exemple, à Paris, tourne sur un cylindre. Elle est balayée, à la manière d'un écran de télévision, par un rayon lumineux : la lumière se réfléchit sur la surface et elle est recueillie par une cellule photo-électrique qui enregistre ses variations. Les impulsions électriques sont transmises, par ligne, à distance, dans le midi de la France pour certains des quotidiens parisiens. Là, tourne à la même vitesse un cylindre identique recouvert d'un papier photosensible. Les impulsions électriques commandent une lampe qui impressionne proportionnellement le papier. Après développement, la page ainsi transmise sert à la constitution du cliché pour le tirage en offset.

Cent cinquante secondes suffisent à la transmission de la page. Le journal peut être imprimé à la fois à Paris et à mille kilomètres de là. Il est dans les kiosques en même temps que les quotidiens régionaux. Les délais et les frais de transport se trouvent ainsi considérablement réduits.

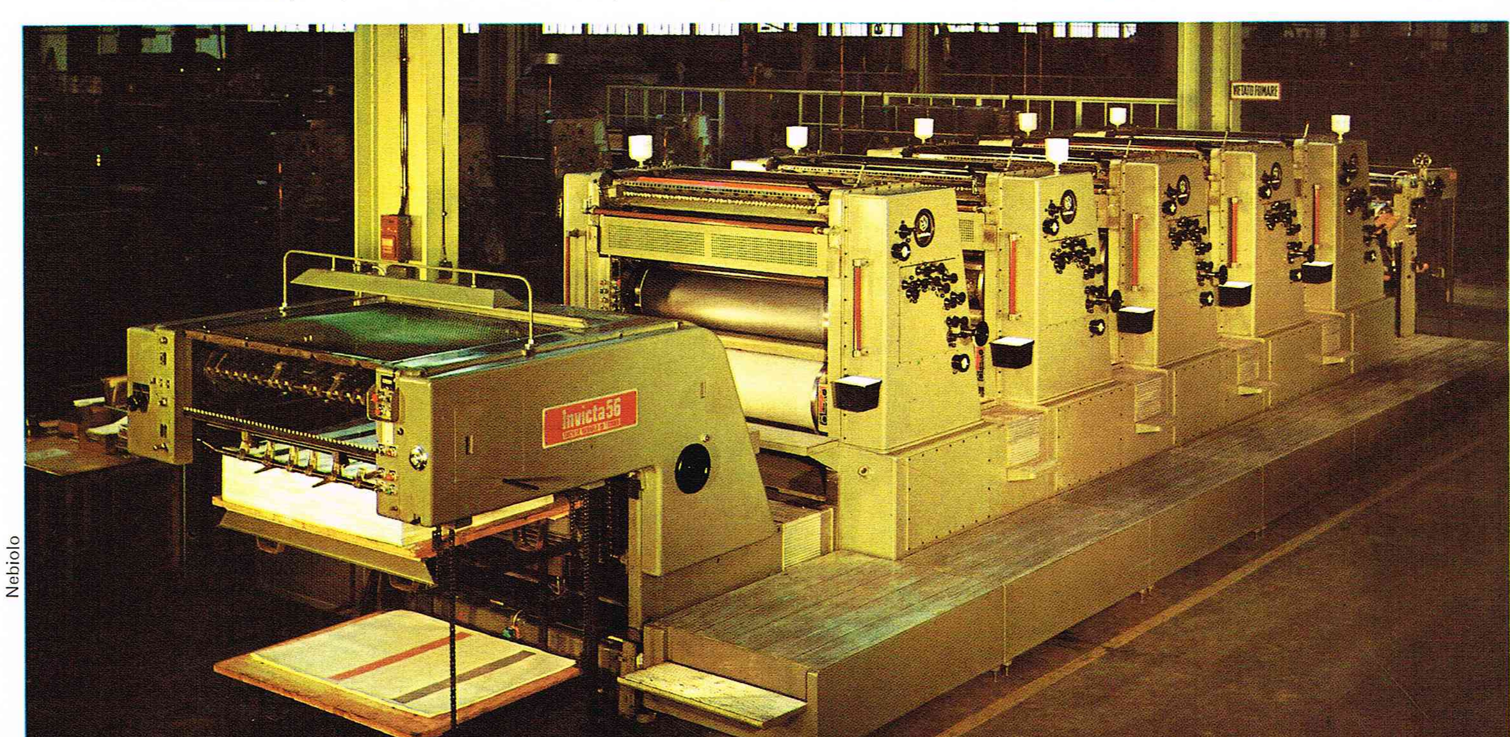
### Le télécopieur

Le procédé est désormais très fiable et connaît des usages domestiques. Le télécopieur, s'il n'est pas encore généralisé, est entré dans les mœurs. Transmettre un document, même écrit à la main, et même s'il s'agit d'un schéma dessiné, demande aujourd'hui trente secondes par le canal d'une ligne téléphonique. Un service international de fac-similé existe déjà entre les États-Unis d'une part, l'Europe et le Japon d'autre part.

### Le fac-similé à domicile

L'une des techniques de diffusion de l'avenir, pour la presse, est assurément un service de fac-similé qui permettrait la réception des nouvelles à domicile par l'abonné. L'appareil est techniquement au point. Son coût devrait baisser avec l'extension du marché.

▼ *Une machine **rotative offset** ; outre son avenir dans la grande presse, le procédé offset connaît de nombreux débouchés dans la reproduction au niveau des entreprises et des administrations qui peuvent envisager la création de petites imprimeries dites intégrées (machine Nebiolo Invicta 56).*




Nebiolo

## La reproduction à quelques exemplaires

Parallèlement au développement de l'industrie du papier, au perfectionnement des techniques d'impression utilisant le plomb ou la lumière pour fabriquer des documents imprimés de grande diffusion, les différents procédés de duplication et de reprographie connaissent une expansion rapide. En effet, le volume annuel des copies est passé ces quatre dernières années de dix milliards cinq cent millions à vingt et un milliards cinq cent millions (*Le Monde*, 21 septembre 1976). Ces copies sont diffusées au sein des administrations, des industries qui ont souvent éprouvé la nécessité de créer une petite imprimerie, où sont rassemblés des appareils de reprographie et de duplication.

Comment classer ces différents procédés de reproduction? On peut, dans une première approche, distinguer la duplication, qui permet la fabrication d'un très grand nombre de textes identiques à partir d'un document établi sur un support adapté, de la reprographie, technique de reproduction de n'importe quel document, tel qu'il est, sans qu'il subisse une modification quelconque.

## La duplication

Les procédés de duplication peuvent se classer en trois grandes catégories, suivant les appareils utilisés : le duplicateur à cliché hectographique, les duplicateurs à stencil, les appareils utilisant la technique « offset ».

### Les appareils à clichés hectographiques

Ce sont les appareils les moins coûteux — autour de 500 F en France —, qui permettent le tirage manuel ou automatique électrique de 100 à 300 copies à partir d'un cliché hectographique.

Il faut d'abord préparer le cliché hectographique, qui est une feuille de papier enduite d'un côté d'une couche spéciale. On dactylographie le texte, ou on écrit ou dessine avec une pointe sèche sur la face non enduite, avec une force suffisante pour que les caractères apparaissent nettement à l'envers sur la face enduite. On obtient ainsi un cliché. Ensuite c'est la phase de tirage : on fixe le cliché sur un cylindre ou tambour, souvent en fonte d'aluminium poli. La feuille de papier passe entre le tambour en rotation et un cylindre de caoutchouc, le rouleau de pression, et le texte est alors imprimé. Il est nécessaire d'utiliser un révélateur et d'en humecter les feuilles avant leur passage. Ce révélateur est souvent de l'alcool industriel, et il existe plusieurs dispositifs d'humectage, le plus simple étant un rouleau de feutre. Il est possible de faire des tirages à plusieurs couleurs avec un seul tirage, si le cliché est établi avec des carbones de plusieurs couleurs. Les dimensions des documents peuvent varier, depuis la simple étiquette — dans le cas des machines à adresser — jusqu'à des formats 48 cm × 70 cm. En complément du duplicateur, on peut utiliser des systèmes aptes à réaliser un cliché hectographique à partir d'un original noir et blanc ou d'une photocopie. Ces duplicateurs à alcool sont très répandus, notamment dans les collectivités, et leur faible prix leur garantit un avenir certain.

### Les appareils à stencil

Ce sont les appareils les plus répandus. En 1975, ils représentaient encore 65 % du nombre des appareils de duplication installés en France. Avec un stencil, on peut faire des tirages plus importants : quelques milliers de copies.

Un stencil est constitué par un support de papier résistant, enduit d'une couche superficielle de laque qui le rend imperméable à l'encre. Par la simple frappe d'une machine à écrire sans ruban ou par traçage avec une pointe sèche, on rend le cliché perméable à l'encre. La frappe doit être suffisamment puissante, les caractères propres afin d'obtenir des perforations de la couche imperméable très nettes. L'encre les traversera, et une feuille de papier appliquée contre le cliché sera imprimée. Il est aussi possible de réaliser un cliché à partir d'un document original, avec une grande précision. Il s'agit du « stencil électronique », obtenu par un dispositif complexe : un rayonnement lumineux balaie le document; les variations de l'intensité lumineuse sont mesurées et commandent une pointe en tungstène qui reproduit sur le stencil les traits et caractères du premier document.

Les dispositifs d'impression sont simples : le stencil est appliqué sur le tambour du duplicateur, lequel est encré. Les feuilles à imprimer sont placées sur un plateau d'alimentation; elles sont attirées, passent contre le tambour en rotation et sont imprimées et récupérées sur un plateau de réception. Le tambour est généralement entraîné par un moteur électrique, et sa vitesse est variable. Il y a souvent un compteur qui commande un arrêt automatique lorsque le nombre de tirages désiré est atteint. Bien que des progrès soient encore possibles, il est très difficile d'obtenir un document parfait, à cause de la technique de création et du support du stencil. C'est pour cela que le parc de duplicateurs à stencil n'a pas augmenté depuis 1973. En effet, les techniques de reprographie ont évolué en même temps : l'offset s'est simplifié, son coût s'est abaissé et il a investi nombre de petits ateliers d'imprimerie.

### Les duplicateurs offset

On a vu que le procédé offset s'était largement développé pour l'impression des journaux. Des machines beaucoup plus légères sont maintenant d'usage courant dans les entreprises et les administrations, la technique offset donnant des tirages d'excellente qualité, dans des conditions rentables dès qu'on dépasse cent exemplaires.

On sait que l'offset repose sur l'hydrophobie des corps gras, lesquels ne se mouillent pas. Sur le cliché, souvent métallique, les parties à imprimer sont enduites d'un corps gras. Ce cliché est mouillé : l'eau n'adhère pas sur les zones enduites. La plaque est encrée, mais l'encre a une composition telle qu'elle ne se fixe pas sur les parties mouillées. L'impression a lieu en deux étapes : le cliché est appliqué sur un rouleau sur lequel l'encre se dépose sélectivement, puis la feuille de papier est imprimée par mise au contact avec le rouleau encreur, appelé le blanchet. Au niveau du petit atelier, rien ne distingue le procédé offset de celui employé pour la grande presse. Les variantes sont introduites au niveau de la dimension des machines, de leur rapidité, mais aussi à celui de la préparation du cliché.

Il existe des composeuses mécaniques qui effectuent la justification automatique des marges, des composeuses photographiques à rubans perforés : on frappe le texte, mais la machine produit en même temps un ruban de papier perforé qui permettra la réalisation du cliché composé. Il existe également des plaques présensibilisées. Cette souplesse d'utilisation, associée à la qualité des copies obtenues, fait que le procédé offset se développe. En 1975, bien qu'il y eût quatre fois moins de duplicateurs offset que de duplicateurs à stencil, on réalisait avec les premiers deux fois plus de copies, la productivité d'un appareil offset étant en moyenne huit fois supérieure.

## La reprographie

Lorsqu'il s'agit de reproduire un document existant et d'en faire quelques dizaines de copies, c'est le domaine de la reprographie. Les procédés, dans ce domaine, sont très nombreux, mais les plus anciens, exigeant souvent un révélateur et donc un bain, ont tendance à disparaître devant des techniques telles que l'électrocopie et la thermocopie.

### Les anciens procédés : la diazocopie

Dans le cas de la diazocopie, on expose à la lumière un papier sensible, sur lequel se fixe l'image de l'original; puis l'image est rendue apparente par un révélateur. La technique d'exposition est différente suivant que le document original est transparent, opaque, ou encore imprimé recto verso; dans ce cas, une exposition par réflexion est nécessaire.

Pour le tirage des plans, application essentielle de la diazocopie, le papier sensible est recouvert d'une émulsion à base de colorants diazoïques. Or le rayonnement ultraviolet détruit ces colorants, qui se colorent au contact d'un révélateur adéquat. Le plus souvent, on utilise un support transparent — un calque —, et les parties à imprimer sont faites avec une encre opaque à l'ultraviolet. L'exposition est faite par transparence et la révélation effectuée ensuite. C'est un procédé simple,



▶ *La reproduction à quelques dizaines d'exemplaires d'un document déjà existant procède du domaine de la reprographie; ici, le copieur II d'IBM.*

en perpétuelle évolution, bien adapté à la reproduction des plans.

On peut citer, pour mémoire, des procédés voisins, aux sels métalliques : la gélatinographie, la photocopie au sens strict, qui utilise des sels d'argent et qui a donné naissance à de très nombreuses variantes.

### L'électrocopie

Les procédés électrostatiques sont de loin les plus répandus, depuis 1960 notamment, époque vers laquelle furent mises sur le marché les premières machines Rank Xerox. Notons que l'invention date de 1938 et que ce n'est qu'en 1946 que son exploitation commerciale fut décidée, pour n'aboutir que vers 1956.

L'électrocopie utilise la propriété de certains composés qui, isolants à l'obscurité, deviennent conducteurs lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Si une plaque ou un tambour est revêtu d'un tel matériau et si ce matériau est chargé électriquement en surface — ce qui est possible, car il est isolant —, il suffit de projeter sur lui le document à reproduire. La charge électrique disparaît dans les zones éclairées, mais demeure dans les zones noires. On a donc une image électrostatique, et une encre en poudre qui sera fixée par les charges électriques restantes restituera l'image. Cette idée de base a donné lieu à deux grands procédés, suivant que la copie est réalisée sur un papier ordinaire ou sur le papier photoconducteur lui-même. Le premier, commercialisé par Xerox, utilise du sélénium, l'autre, développé par Smith-Corona-Marchant (SCM), nécessite un papier contenant de l'oxyde de zinc.

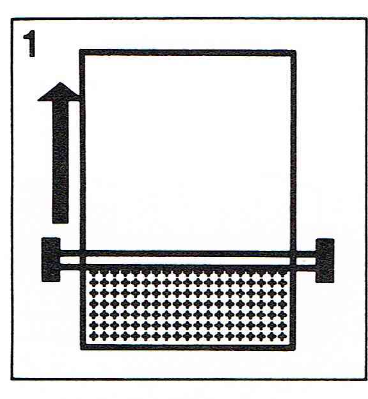
### Le procédé Xerox au sélénium

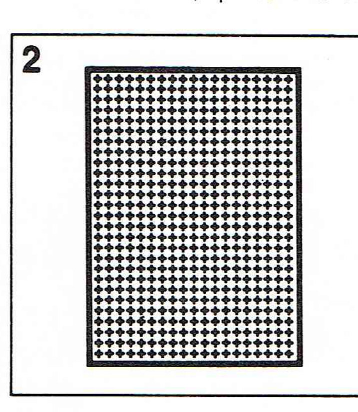
Le corps photoconducteur est le sélénium, métalloïde de la famille du soufre, qui est fixé en couche mince sur une plaque d'aluminium. On crée sur cette couche une densité de charge positive uniforme par le passage au voisinage d'une électrode portée à haut potentiel. On projette ensuite l'image du document sur cette plaque : dans les zones claires du document, la charge électrique positive disparaît, tandis que, dans les zones sombres correspondant aux caractères imprimés, cette charge est conservée. On obtient ainsi une image électrostatique du document sur la plaque de sélénium. Cette image est d'ailleurs inversée, à cause du dispositif optique. C'est la première étape. La deuxième étape consiste à faire apparaître l'image sur la plaque en fixant de l'encre en poudre : cette poudre, le « toner », est chargée négativement, si bien qu'elle est attirée par les charges positives du sélénium. Ensuite, il faut transférer cette image sur une feuille de papier ordinaire. Cette opération est simple : le papier est chargé positivement, et il est appliqué sur la plaque de sélénium. Le « toner », portant des charges négatives, est attiré par le papier, sur lequel apparaît alors l'image définitive. Il reste à fixer cette poudre sur le papier, par passage dans un four électrique : la poudre fond et adhère définitivement à la feuille. On a ainsi obtenu une copie du document original en noir et blanc. La plaque de sélénium nettoyée de la poudre résiduelle, rendue électriquement neutre, peut servir pour réaliser une nouvelle copie.

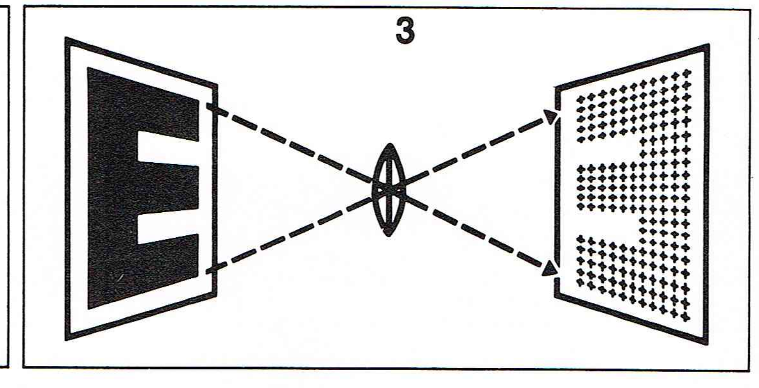
En résumant, il y a donc quatre étapes : exposition et création de l'image latente, fixation de la poudre sur la plaque, transfert de l'image sur la feuille de papier, fixation définitive de la poudre. Ces quatre phases se retrouvent toujours, sauf si on désire plusieurs copies d'un même original. Il est possible, avec certaines machines, d'obtenir des copies avec un format réduit, la réduction étant réalisée par le dispositif optique de projection de l'original sur la plaque.

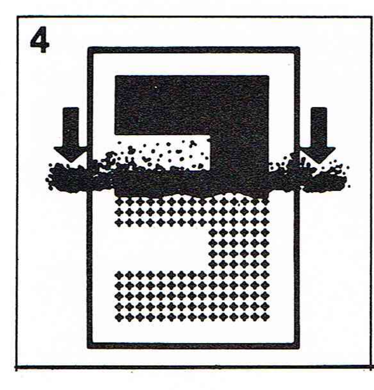
### Le procédé à l'oxyde de zinc

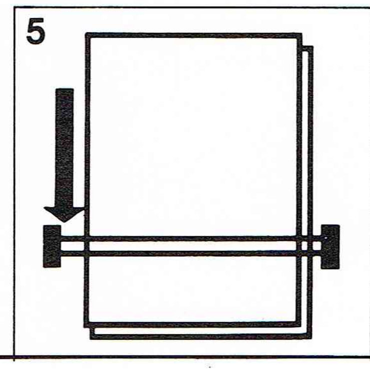
Il s'agit d'un procédé électrostatique, qui nécessite l'emploi d'un papier dont l'une des faces est recouverte par une couche superficielle riche en oxyde de zinc. Ce papier passe d'abord entre deux électrodes dont la différence de potentiel atteint plusieurs milliers de volts. L'ionisation de l'air permet à un faible courant de passer d'une électrode à l'autre. Comme dans le cas précédent, on projette l'image, mais sur la face du papier portant une densité superficielle de charges négatives. Sous l'effet de la lumière, donc dans les zones blanches, l'oxyde de zinc devient conducteur. Les charges électriques sont mobiles, le papier n'étant plus isolant, si

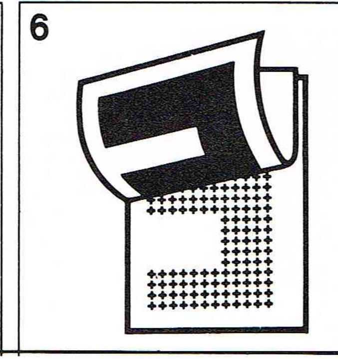


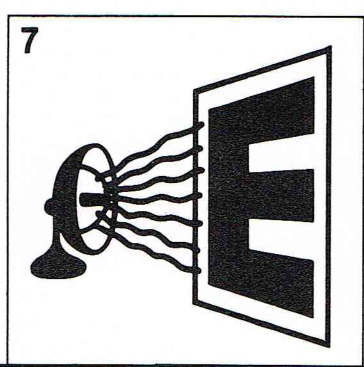













▼ *Principe de la reproduction de documents par le procédé Xerox au sélénium : 1, dans l'obscurité, une surface de sélénium (plaque ou tambour) est balayée par une grille sous courant à haute tension; 2, on obtient ainsi une surface photosensible; 3, l'image du document original (E) est projetée sur la surface de sélénium; les zones atteintes par la lumière perdent leur charge électrique, les zones restées dans l'ombre la conservent; 4, une poudre est projetée uniformément sur la surface de sélénium; elle est attirée par les zones qui ont conservé leur charge électrique, une image poudreuse est ainsi obtenue; 5, une feuille de papier appliquée sur la surface de sélénium reçoit une charge électrique; 6, l'image poudreuse est transférée du sélénium sur le papier au moyen de la charge électrique qui lui est appliquée; 7, l'image est fixée thermiquement sur le support choisi (document Rank Xerox).*

bien que charges positives et négatives se neutralisent. Par contre, dans les zones non éclairées, correspondant à l'impression du document original, apparaît une image latente, due aux charges négatives conservées par la présence de l'oxyde. Il suffit ensuite de fixer un pigment noir chargé positivement, ce qui fait apparaître l'image sur la feuille de papier. On peut utiliser soit une poudre qui est fixée par cuisson, soit une encre liquide, le carbone restant fixé après évaporation du solvant.

Le procédé du ZnO est donc plus simple que le procédé Xerox, car il n'y a pas transfert de l'image d'un support sur un autre. Le système optique, d'ailleurs, sera différent, l'image qui apparaît sur le papier par photoconduction étant l'image définitive. Bien que la technique à l'oxyde de zinc nécessite un appareillage moins sophistiqué, le fait d'utiliser un papier spécialement traité constitue un inconvénient majeur. La tendance actuelle est donc marquée par un développement plus rapide de la xérocopie, et, en 1975, on réalisait presque trois fois plus de copies sur papier ordinaire que sur le papier à l'oxyde de zinc.

#### *La thermocopie*

C'est une technique simple, utile surtout si on veut seulement quelques exemplaires de l'original. On utilise ici une autre propriété : celle que possèdent les corps noirs d'absorber la lumière au lieu de la réfléchir, donc de s'échauffer et de réémettre l'énergie lumineuse captée sous forme de rayonnement infrarouge. Des parties noires d'un document exposé à la lumière vont émettre des rayons infrarouges qui pourront impressionner une plaque sensible, ce qui produira une copie. Tel est le principe de la thermocopie.

La réalisation en est très simple. Il suffit d'appliquer le papier sensible et l'original l'un contre l'autre et de les exposer au rayonnement d'une lampe infrarouge. Les parties imprimées de l'original absorbent le rayonnement, et la chaleur dégagée provoque directement l'apparition sur le papier sensible de la reproduction positive, sans autre manipulation. C'est donc un procédé rapide, peu coûteux. Le papier sensible se conserve bien, même à la lumière. Cependant, la copie directe ne donne pas toujours de bons résultats, certaines encres se prêtant mal à une telle technique. Un perfectionnement, fondé sur l'emploi d'une copie photographique intermédiaire, a été proposé par la compagnie Minnesota et donne des résultats bien meilleurs.

D'une manière générale, la thermocopie se maintient dans le bas de la gamme des procédés, surtout s'il s'agit de réaliser à moindres frais un nombre très limité de copies. Les appareils fondés sur ce principe sont les plus répandus — presque la moitié des appareils de reprographie sur le marché français — mais fournissent seulement entre 4 et 5 % des copies.

## *Le journal sans papier*

Le journal écrit, *sans papier*, existe : la téléinformatique permet de faire passer sur l'écran de télévision des pages de texte. En Grande-Bretagne, le procédé CEEFAX permet au téléspectateur d'obtenir un supplément écrit aux programmes de la télévision en manipulant quelques touches d'un décodeur. En France, un système analogue, ANTIOPE est à l'étude, ainsi qu'un terminal domestique utilisant le téléviseur et le combiné téléphonique : TICTAC.

Avec le **procédé CEEFAX**, la B.B.C. offre les services d'un quotidien, perpétuellement mis à jour.

L'utilisateur dispose d'un boîtier, ressemblant à une calculatrice, qui commande les pages de texte. La pression d'un premier bouton remplace l'image du programme par un sommaire indiquant les nouvelles disponibles : sports : 12, agriculture : 14... Les touches « 1 » et « 2 » amènent sur l'écran les résultats sportifs, « 1 » et « 4 » les dernières nouvelles agricoles, etc.

Chaque page ne comporte que 24 lignes, mais le système en contient une centaine, que des journalistes peuvent mettre à jour au fur et à mesure de l'évolution de l'information.

Une touche spéciale permet enfin de prévoir le passage, en sous-titres, d'informations importantes. Le téléspectateur suit le programme normal. Si un événement important survient, un sous-titre de quelques lignes, en bas de l'écran, l'en avertit. Le système a été commercialisé au cours de l'année 1977.

Les informations de CEEFAX sont portées par le faisceau hertzien de l'émission de télévision. Le procédé utilise les lignes libres que comporte chaque image télévisée pour transmettre les textes codés. Les caractères peuvent apparaître en plusieurs couleurs, et le CEEFAX peut transmettre aussi des schémas et cartes (pour les prévisions météorologiques par exemple). L'utilisation des faisceaux hertziens permet en outre d'envisager la diffusion d'informations régionales.

**ANTIOPE** (« Acquisition Numérique et Télévisualisation d'Images Organisées en Pages d'Écriture ») est le nom du système de télétexte étudié par le Centre commun d'études de télévision et de télécommunications. Reprenant le principe mis au point par les Britanniques, les techniciens français espèrent améliorer les possibilités du système : utilisation d'alphabets multiples (cyrillique, arabe...) pour l'enseignement des langues ou les magazines à destination des minorités linguistiques, services graphiques plus étendus, etc.

Le **système TICTAC** se rapproche plus de la conception du terminal domestique, relié à une banque de données. Des centres informatisés de renseignements existent aujourd'hui dans de nombreux secteurs d'activités : les agences de voyages, la vente sur catalogue sont les plus proches du grand public. Dans certaines grandes villes, comme Lyon, une banque de données locales donne les renseignements utiles, mais la manipulation d'un terminal ordinaire, à domicile, demeure irréaliste.

La conception du TICTAC, « Terminal Intégré Comportant un Téléviseur et l'Appel au Clavier », résout le problème du langage informatique. Ce système utilise un récepteur de télévision sur l'écran duquel l'information, transmise par ligne téléphonique, apparaît grâce à un dispositif d'interconnexion. Les touches du combiné téléphonique constituent le dispositif d'appel.

Techniquement au point, TICTAC n'est pas encore commercialisé. Le dispositif expérimental donne des renseignements d'ordre pratique : horaires des trains, ... mais également les informations transmises par l'Agence France-Presse.

La mise au point de ces techniques nouvelles est susceptible d'inquiéter les professionnels de l'information. Les systèmes utilisant les récepteurs de télévision sont encore limités par des contingences techniques : nombre de lignes sur l'écran surtout, qui obligent à des informations très succinctes. Mais de nombreux lecteurs se contentent de quelques titres indiquant les faits saillants. En outre, la création de banques de données locales accessibles par téléphone réduit l'un des avantages de la presse locale, moins touchée que les journaux nationaux par le développement de la télévision, en raison de sa spécificité géographique. Déjà, la simplification des procédés d'impression a permis la création de feuilles de faible diffusion concurrentes des organes plus vastes aux lourds équipements.

Cette évolution technique devrait permettre le développement de deux tendances déjà engagées :

— la collaboration des différents moyens d'information,

— l'évolution de la grande presse vers une réflexion sur l'événement complétant l'énoncé rapide donné par les moyens audiovisuels.

## BIBLIOGRAPHIE

AUDIN M., *Histoire de l'imprimerie. Radioscopie d'une ère. De Gutenberg à l'informatique,* Paris, 1972. - BARGILLAT A., *l'Imprimerie au XXe s.,* P.U.F., 1967. - BARGILLAT A., *Impression offset,* Institut national des arts graphiques, 1969 - CHAUVE R., *Informatique et Arts graphiques,* Éd. Ika, 1975. - DESCROIX P., *la Technique de la reprographie et ses applications pratiques,* Éd. Le Prat. - LA BORDERIE, *Toute l'imprimerie,* Dunod, 1970. - LECHENE R., *l'Imprimerie moderne : la Deuxième Mort de Gutenberg,* Éd. du Cap, 1967. - LECHENE R., *l'Imprimerie de Gutenberg à l'électron,* Éd. Fata Morgana. - LETOUZEY, *la Typographie,* P.U.F., Que sais-je ?, nº 1101. - MARTIN G., *l'Imprimerie,* P.U.F., Que sais-je ?, nº 1067.

# LA CONSERVATION DE L'INFORMATION

Une information n'a de valeur et d'existence que dans la mesure où elle atteint son destinataire. Il faut donc qu'elle ne soit pas perdue, autrement dit qu'elle soit conservée, et conservée de telle manière qu'elle puisse être retrouvée. Cela implique un traitement de l'information, c'est-à-dire la réalisation d'un ensemble de tâches touchant la conservation matérielle des supports de l'information, le classement des documents en fonction de leur support physique et de leur nature, enfin un travail intellectuel d'analyse qui devra permettre, par la constitution d'une donnée intermédiaire, de retrouver l'information primaire. C'est en la réalisation de l'ensemble de ces opérations — dont le but est la transmission de l'information à chacun de ceux qui peuvent en avoir besoin — que consiste le métier de bibliothécaire.

## *L'information : vecteur et support*

Il n'est d'information que transmise. Cette transmission implique un code, un signe ou un signal.

L'homme primitif transmet son message en utilisant le langage oral ou gestuel : certains langages gestuels possèdent un vocabulaire étendu et même une syntaxe propre. Ainsi, certains Indiens d'Amérique du Nord pouvaient converser longuement par gestes alors qu'ils parlaient des langues différentes. La communication peut également se faire au moyen de signaux à distance comme par exemple le tambour africain.

Au-delà des gestes et signaux apparaissent les « écritures autonomes », comme les nœuds utilisés pour le comptage des animaux dans l'Empire inca ou les signes géométriques sous forme d'entailles dans le bois, de gravure dans la pierre, de peinture, etc. Il s'agit là des premiers messages susceptibles d'être conservés : l'information est née.

Cette information va tendre à se préciser et, dans un second temps, l'écriture essaiera de coïncider avec le langage articulé de façon très approximative : un signe ou un groupe de signes suggèrent une phrase entière. Il y a une multitude de signes, puisqu'il existe une multitude de phrases : ils constituent une écriture synthétique.

Une troisième étape est franchie lorsque le signe ne signifie plus une phrase, mais un mot. Les nouveaux signes ont alors une valeur constante, et le texte exact de chaque phrase peut être conservé. Ce stade correspond aux écritures analytiques ou idéographiques : écritures cunéiformes, hiéroglyphiques, écriture chinoise. Suivant le même principe, s'il y a moins de mots que de phrases, il y a moins de sons que de mots : les signes vont donc représenter les syllabes. Enfin, ultime simplification, de l'écriture syllabique on passe à l'écriture alphabétique consonantique (c'est-à-dire où seules les consonnes sont notées) : écriture phénicienne dont sont dérivés l'arabe et l'hébreu ; puis à l'écriture alphabétique à voyelles : grecque, cyrillique et latine.

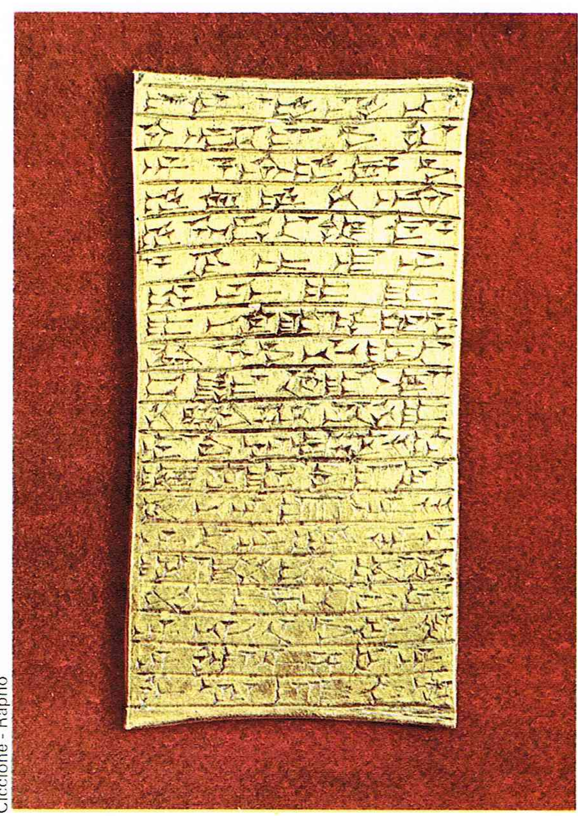
Inventer la communication ne suffit pas, il faut encore, pour que l'information se perpétue et se transmette, la consigner sur un support durable. Depuis l'origine, les hommes ont utilisé ainsi toutes sortes de matériaux, à commencer, si l'on veut, par les murs de leurs habitations... Depuis l'Antiquité, en tout cas, de nombreuses matières ont été employées à cette fin : les tablettes d'argile, supports des écritures cunéiformes dans les royaumes de Sumer et Akkad ; les carapaces de tortues et les plaques de bois dans l'ancienne Chine ; les écorces d'arbre de différentes essences : tilleul, olivier, palmier et le plus célèbre, le papyrus, fabriqué à partir d'un roseau de grande taille dans l'ancienne Égypte, mais aussi dans l'Empire romain et utilisé dans le monde occidental jusqu'au XIIe siècle. L'emploi des textiles fut également courant : les bandelettes enveloppant les momies égyptiennes portaient des hiéroglyphes ; la soie était utilisée, en Chine et en Perse notamment, et le fut jusqu'au XVIIe siècle en Occident, en particulier pour l'impression des thèses. Le cuir, avant d'être réservé aux reliures, a longtemps servi de support à l'écriture à partir du moment où, au IIIe siècle avant notre ère, a été inventé à Pergame, ville d'Asie Mineure, l'art de traiter les peaux. C'est de là que vient le nom de *pergamentum* dont est dérivé le mot parchemin. C'est à ce support que nous devons la transmission de la plus grande partie de la littérature antique.

Si le mot « papier » vient du grec et du latin papyrus, bien qu'il constitue une matière tout à fait différente, c'est en Chine qu'il a été inventé, dans un souci d'économie : la soie utilisée étant trop coûteuse, on chercha à fabriquer une matière à partir de déchets de soie, puis de déchets de coton. Le procédé, inventé en 105 avant

*▶ L'information est née avec les premiers messages susceptibles d'être conservés, mais pour qu'elle se transmette, il faut des supports durables ; depuis l'origine, les hommes ont donc utilisé toutes sortes de matériaux : par exemple la pierre pour cette peinture rupestre du Tassili (à gauche). Deux étapes importantes sont franchies dans la simplification de l'écriture, d'abord lorsque apparaissent des signes ne signifiant plus une phrase mais un mot, il s'agit alors des écritures idéographiques, comme, à droite, l'écriture cunéiforme (plaque commémorative de la fondation Khorsabad, musée du Louvre, Paris), et ensuite l'écriture consonantique où seules sont notées les consonnes (comme page ci-contre à gauche sur ce manuscrit arabe issu d'un traité médical d'Avicenne, musée de Bologne, Italie).*



Lajoux - Rapho



Ciccione - Rapho

notre ère, n'atteignit l'Europe, en passant par l'Asie et la Perse, qu'au début du XIIe siècle. Le papier est le seul de tous ces matériaux à être encore utilisé de nos jours, et il a été pendant plusieurs siècles le principal support de l'information.

Cependant, depuis la fin du XIXe siècle et surtout au XXe siècle, de nouveaux *media* sont apparus : photographies, diapositives, films, bandes vidéo, disques, cassettes, bandes magnétiques, microfilms et microfiches. Ils permettent la transmission et la conservation d'images et de sons, accroissant ainsi considérablement la quantité et la qualité de l'information.

## La conservation matérielle des supports

Chaque support pose des problèmes spécifiques de conservation, exception faite de toutes circonstances catastrophiques, incendies ou inondations, qui comptent pour beaucoup dans la méconnaissance partielle de certaines civilisations, comme l'incendie de la bibliothèque d'Alexandrie lors de la conquête de César en 47 avant notre ère : seuls quelques rares documents furent épargnés sur les 700 000 qu'elle contenait sous forme de tablettes, de rouleaux de papyrus ou de parchemin. Certains supports, par leur substance même, sont fragiles, comme le papyrus ou les écorces d'arbres. Tous sont sensibles à la lumière, à la pollution atmosphérique,aux variations de température et à l'humidité de l'air ambiant. La plupart, et particulièrement le papier et les cuirs, peuvent être attaqués par les champignons, les bactéries ou les insectes.

Nous allons voir successivement ces différents agents de destruction des documents, en indiquant les processus de destruction qu'ils engendrent, puis les remèdes à y apporter et les mesures préventives à envisager pour éviter l'apparition de ces phénomènes. Deux types de supports seront plus particulièrement observés : le papier, car c'est le support le plus répandu, et le microfilm d'archive, car l'importance des archives de sécurité constituées dans tous les pays est fondamentale pour la conservation de la mémoire du monde.

Il convient avant tout de noter que le procédé de fabrication du support a une importance capitale pour sa durabilité. Le **papier**, par exemple, est obtenu par le broyage de fibres qui contiennent de la cellulose. Toutes les fibres cellulosiques peuvent être employées pour la fabrication du papier, mais toutes ne donnent pas les mêmes résultats : la résistance d'un papier varie selon la qualité et le pourcentage de cellulose pure qu'elles contiennent. Ainsi, les papiers fabriqués jusqu'à la fin du XVIIIe siècle à partir de fibres de lin, de coton ou de chanvre, appelés couramment *papiers chiffons,* sont d'une excellente qualité : leur cellulose très pure résiste bien au vieillissement. Il n'en est pas de même des papiers à pâtes de bois apparus au XIXe siècle : en particulier les pâtes de bois mécaniques, obtenues par broyage de bois tendres sans que soit opérée de séparation entre la cellulose et les autres composés du bois, fournissent un papier qui contient environ 50 % d'impuretés et dont la longévité est donc fort mal assurée. Le procédé de fabrication des pâtes de bois chimiques, parmi lesquelles il faut distinguer plusieurs qualités, permet l'élimination d'une partie plus ou moins grande des impuretés : le papier obtenu est donc d'assez bonne qualité, sans toutefois atteindre celle des papiers chiffons.

De la même manière, les matières composant les **microfilms** sont déterminantes pour leur conservation, variable selon qu'il s'agit de films à support d'acétate, de nitrate ou de polyester, de films de type diazo ou du nouveau support d'enregistrement appelé film vésiculaire. Par exemple, les films à support de nitrate ou de type diazo vieillissent mal. De plus, le fixage du film doit être opéré dans un bain frais : les films fixés dans des bains vieux et partiellement épuisés se dégradent plus rapidement que les autres. Enfin, le fixage doit être suivi d'un lavage méticuleux.

Les procédés utilisés lors de leur fabrication font donc varier la résistance des supports de l'information aux agressions auxquelles ils sont naturellement soumis.

### *Agents de destruction*

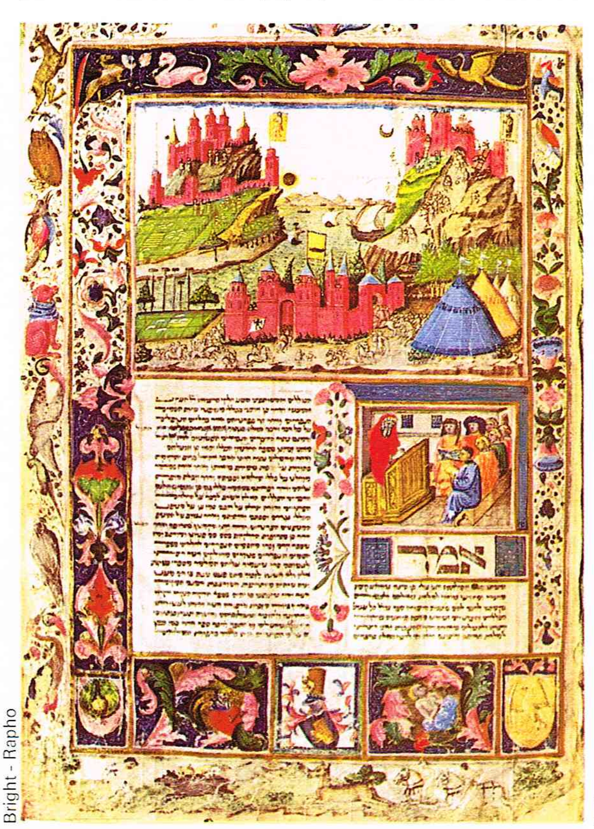
#### La lumière

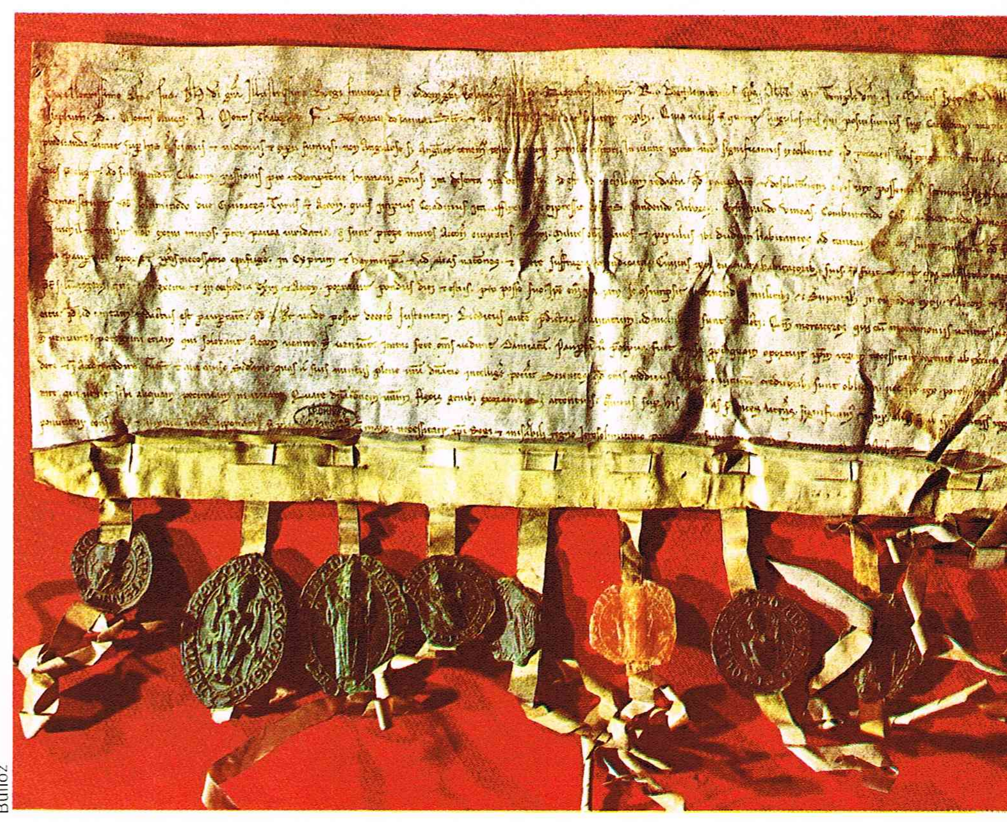
Parmi les agents de destruction, la lumière a été citée. Elle est nuisible pour tous les supports, particulièrement les images : films et microfilms, photographies et diapositives. Elle attaque le papier par oxydation de ses composés phénoliques, provoquant un jaunissement de la surface et une dégradation de la cellulose qui rend le papier cassant.

#### La pollution

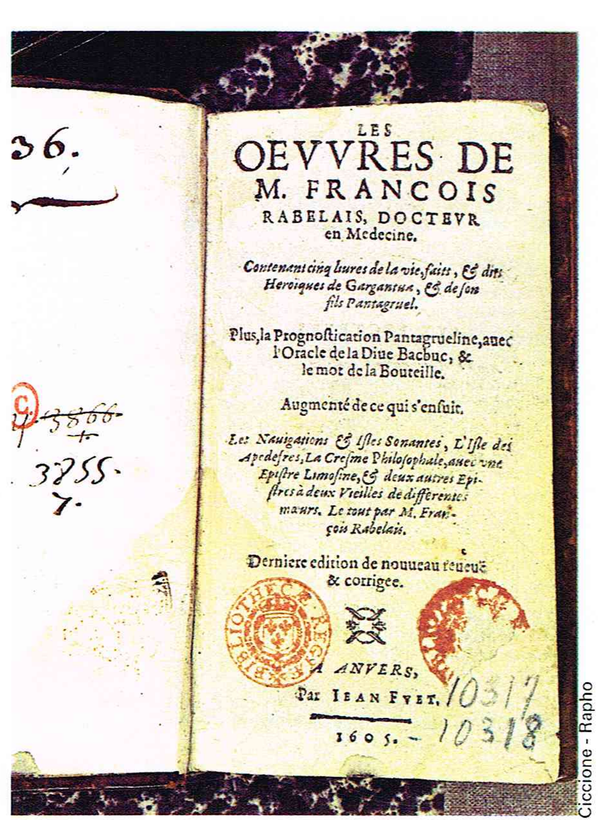
L'atmosphère des villes est dangereuse pour les documents parce qu'elle est porteuse de spores de champignons et qu'elle contient des impuretés comme

*▼ C'est à Pergame, en Asie Mineure au IIIe siècle avant J.-C., qu'a été inventé l'art de traiter les peaux pour en faire du* **parchemin** *; c'est à ce support que nous devons une grande partie de la littérature antique. Ci-dessous, une lettre des prélats de Terre sainte à Philippe Auguste écrite en 1220 sur du parchemin (Archives nationales, musée de l'Histoire de France).*


Bright - Rapho


Bulloz

▶ *Les papiers fabriqués jusqu'à la fin du XVIIIe siècle à partir de fibres de lin, de chanvre ou de coton et appelés* papiers chiffons *résistent bien au vieillissement, contrairement aux papiers à pâte de bois ; ils doivent cependant être protégés de la lumière qui provoque le jaunissement et les rend cassants, de l'humidité excessive et de la chaleur qui favorisent le développement des moisissures, lesquelles désagrègent les papiers et laissent des taches colorées (édition de 1605 de l'œuvre de Rabelais, Bibliothèque nationale, Paris).*




Ciccione - Rapho

l'anhydride sulfureux qui, au contact de l'humidité, se transforme en acide sulfurique (celui-ci détériore le papier et les microfilms), ou comme les chlorures et les composés azotés qui le détruisent également du fait de leurs propriétés hygroscopiques. La pollution atmosphérique est d'autant plus dangereuse pour les microfilms qu'elle les attaque à partir d'un taux extrêmement faible et, de ce fait, impossible à mesurer, ce qui accroît les difficultés de conservation : en effet, les microfilms sont attaqués à partir du moment où la teneur de l'air en anhydride sulfureux et en substances comparables atteint le cent millionième.

### L'humidité et la température

L'humidité, dont l'action varie avec la température, représente de loin le plus grand danger pour tous les types de documents. C'est *l'humidité relative de l'air*, c'est-à-dire son degré de saturation en eau, qui doit être considérée et non la quantité absolue d'eau contenue dans l'atmosphère.

Le papier devient cassant s'il souffre d'une trop grande sécheresse : pour garder sa souplesse et son élasticité, il doit bénéficier d'une atmosphère suffisamment humide : environ 50 % d'humidité relative. Mais surtout, c'est l'humidité excessive, jointe à une forte chaleur, qui est à l'origine des corrosions graves d'ordres physico-chimique et biologique.

En effet, le papier et le parchemin, notamment, sont des composés organiques extrêmement hygroscopiques. La cellulose contenue dans le papier s'hydrolyse au contact d'une chaleur humide : le papier perd donc de sa résistance physique et devient cassant. D'autre part, l'humidité liée à la chaleur entraîne une corrosion biologique, qui est la plus importante : elle favorise, en effet, la germination des spores de champignons et la fructification des bactéries toujours en suspension dans l'atmosphère. Une température supérieure à 22 °C et une humidité relative supérieure à 65 % permettent la germination de ces spores, faisant apparaître un duvet blanchâtre au contact du papier qui constitue un milieu extrêmement nutritif. Ces champignons papyricoles, généralement microscopiques, sont désignés le plus souvent sous le terme de moisissures ; ils désagrègent les papiers, les parchemins et les cuirs en laissant sur eux des taches colorées dues aux pigments qu'ils sécrètent. La dégradation bactérienne du papier s'effectue uniquement par des bactéries aérobies cellulolytiques dont l'action se traduit par la formation de taches rouge, brun, vert, rouille... ; outre cette pigmentation du papier, certaines bactéries décomposent la cellulose.

De même, l'humidité et la chaleur favorisent la destruction des microfilms en accélérant les effets de la pollution atmosphérique. Parmi les dommages que peuvent, en effet, subir les microfilms, un des plus sérieux est dû à l'oxydation locale de l'argent de l'image qui entraîne la formation de dépôts minuscules d'argent colloïdal coloré donnant des taches d'oxydo-réduction brun-jaunâtre. Ces taches se développent sur les couches extérieures et sur les rayures de l'émulsion, en plus grand nombre sur les négatifs que sur les positifs. Le développement de ces taches, observées pour la première fois dans les années 1960, s'effectue au rythme de 10 % par an.

### Les insectes

Les derniers agents de destruction qui s'attaquent principalement aux papiers, aux cuirs et au bois sont les insectes : depuis les « poissons d'argent », longs de 8 à 11 mm, recouverts d'écailles, qui affectionnent les endroits sombres et frais et tracent dans les volumes de longues coupures sinueuses, jusqu'aux termites, insectes des pays chauds mais aussi des régions tempérées, qui provoquent des dégâts d'autant plus énormes qu'ils ne sont décelables qu'au dernier moment. Citons aussi : les blattes qui creusent des galeries dans les livres ; les « poux du livre » qui s'attaquent surtout à la colle et aux cuirs ; les « vrillettes » qui percent le bois, mais aussi les livres par rangées entières, etc.

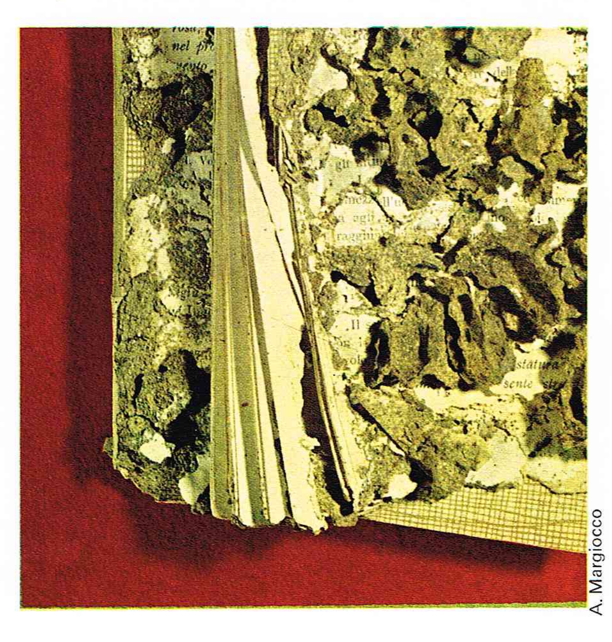
## *Conservation des autres éléments du document*

La maintenance des documents dépend également des autres éléments matériels qui les composent ou les entourent : reliure, colle et encre pour les textes sur papier ; pochettes et boîtes pour les microfilms. La qualité de ces éléments dépend de leur composition et de leurs procédés de fabrication.

C'est la préparation du **cuir**, plus que sa nature, qui est déterminante pour sa conservation : un bon tannage végétal, à base d'écorce de chêne (aujourd'hui remplacé par des produits chimiques), ou minéral, à base d'alun ou de sels de chrome, permet d'éviter la moisissure.

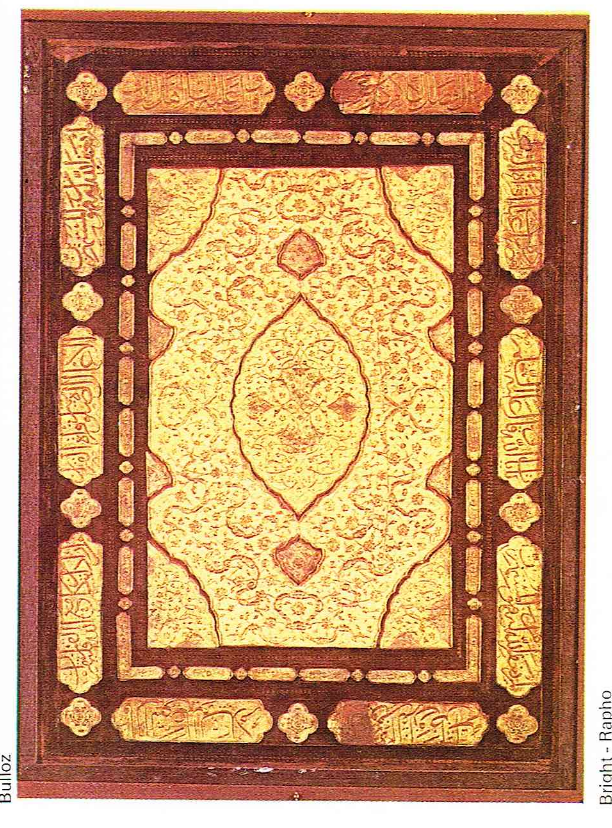
Les **colles** traditionnelles à base de farine, d'os ou de poisson se décomposent et craquèlent en vieillissant par suite de l'hydrolyse de l'amidon ou de la dextrine qu'elles contiennent ; les colles synthétiques sont de meilleure qualité.

Les **encres** anciennes à base de noir de carbone en suspension dans des huiles étaient d'excellente qualité et extrêmement tenaces, comparables à l'encre de Chine actuelle. L'or et l'argent ont été utilisés pour écrire dès la Grèce antique ; au Moyen Age, on les utilisait pour l'écriture sur parchemin pourpre ou pour les enluminures réalisées avec des encres d'autres couleurs : vertes, rouges ou bleues. A partir du XIIe siècle, toutefois, on



A. Margiocco

▶ *Autres agents de destruction pour le papier et le cuir, les insectes, avec notamment les termites de l'espèce* **Reticulitermes lucifugus**, *qui peuvent provoquer des dégâts importants dans une bibliothèque.*



Bulloz



Bright - Rapho

▲ *A gauche, la reliure en cuir remarquablement conservée d'une édition du Coran datée du XVI^e siècle ; plus que la qualité du cuir, c'est sa préparation qui est déterminante pour la conservation (musée du Louvre, Paris). A droite, un atelier de restauration de manuscrits à Venise.*

a commencé à utiliser des encres à base de mélange de noix de galle et de sulfate de fer de moins bonne qualité. De même, les encres renfermant de l'alun de fer et de l'aniline utilisées à partir du XIX^e siècle, très fugaces, sont corrosives pour leur support. Elles libèrent, au contact d'une humidité excessive, de l'acide sulfurique qui transforme le papier ou le parchemin en dentelle.

L'environnement immédiat du microfilm est constitué par sa **pochette** et par la **boîte** dans laquelle sont rangées les pochettes. Les films conservés dans des boîtes de carton se dégradent plus vite que ceux stockés dans des boîtes métalliques : cela semble dû à la formation de peroxyde lorsque le carton vieillit. Le peroxyde se désintègre au contact de l'argent du film qui est particulièrement protégé par la gélatine ; les hydroxyles qui se forment alors par réaction réagissent à leur tour avec la gélatine. De plus, le papier et le carton contiennent une résine préjudiciable au film. Les pochettes dans lesquelles sont placés les microfilms doivent répondre à certaines caractéristiques : résistance aux manipulations, imperméabilité aux composés neufs, fermeture aisée mais étanche. Les meilleures sont constituées d'une couche externe de polyester, d'une couche d'aluminium opaque, d'une autre couche de polyester et d'une couche interne de polythène.

### *Traitement et prévention*

Assurer la conservation des documents, c'est donc lutter contre les multiples agents de destruction : traitements fongicides et insecticides, blanchiment chimique des taches du papier, en s'assurant que ces traitements ne seront pas eux-mêmes à l'origine de dégradations. Mais c'est surtout prévenir les attaques en choisissant, lorsque c'est possible, les procédés et matériaux de fabrication et en traitant préventivement les documents : le traitement à l'or des microfilms accroît leur résistance à l'oxydo-réduction, par exemple. La meilleure prévention consiste bien sûr à placer les documents dans les conditions matérielles les plus favorables à leur maintenance.

Ainsi, dans l'hypothèse de la construction d'un dépôt destiné exclusivement à la conservation de documents, le lieu d'implantation choisi devrait l'être en fonction de critères climatiques : faibles variations de température, éloignement de la mer pour éviter les corrosions de l'air salin, éloignement des centres industriels où la pollution atmosphérique est forte. Le bâtiment devrait être parfaitement étanche et aussi complètement isolé que possible, de façon à limiter les effets des variations climatiques extérieures ; ses fenêtres devraient permettre un éclairage suffisant, mais non excessif, et être munies de dispositifs absorbant les rayons infrarouges et ultraviolets et assurant toute l'année une température de 15 à 18 °C et une humidité relative de 55 à 65 % pour les papiers et documents sur supports traditionnels, une température de 10 à 15 °C et une humidité relative de 20 à 30 % pour les microfilms. Une propreté rigoureuse devrait y être observée, et une légère désinfection devrait y être possible annuellement grâce à une séparation en espaces moyens de stockage. Enfin des contrôles de pollution devraient être effectués régulièrement.

Les documents eux-mêmes doivent être stockés sans être tassés, de façon à garantir la libre circulation de l'air entre eux. Les microfilms seront placés dans des pochettes hermétiquement scellées, elles-mêmes placées dans des boîtes d'aluminium scellées contenant un air pur dont l'humidité relative devra être inférieure à 30 % ou, mieux, une atmosphère neutre constituée par exemple par de l'azote. Le stockage à basse température, enfin, accroît la permanence des archives sur microfilms.

Dans le cas d'archives actives : copies pour le prêt au public ou microfilms utilisés par un service et dont la conservation est nécessaire pour une brève période, dix ans par exemple, comme c'est souvent le cas dans les entreprises, les mesures de conservation sont moins rigoureuses : la température des salles devra être maintenue entre 10 et 20 °C avec une humidité relative de 20 à 50 %.

Chaque type de support de l'information présente donc des exigences particulières de conservation. Toutefois, il convient d'établir une distinction en fonction des vocations particulières des dépôts et en fonction de la nature même des documents. De toute évidence, des documents originaux, qu'il s'agisse d'ouvrages, de manuscrits, de films, de documents photographiques, exigeront des soins précis et vigilants ; de même pour des documents précieux par leur nature ou leur matière. Ce type de documents est généralement réuni dans des établissements dont la vocation fondamentale est la conservation : bibliothèques nationales, fonds ancien des bibliothèques locales, archives. Ailleurs, dans les bibliothèques publiques, spécialisées ou de recherche, les collections doivent certes être conservées ; cependant, les règles sont nécessairement assouplies afin de faciliter la consultation de l'ensemble des documents.



Bulloz

▲ *La stèle d'Hammourabi, roi de Babylone (environ 1700 av. J.-C.) porte, gravé recto verso en caractères cunéiformes, le code des lois en vigueur sous le règne de ce souverain (musée du Louvre, Paris); 20 000 autres tablettes à inscriptions cunéiformes, véritables archives découvertes à Tell Hariri, ont permis la connaissance de la vie à Babylone, à cette époque.*

▶ *Livres anciens aux Archives nationales; devant la multiplication considérable des documents, les archivistes des ministères et des administrations sont obligés de procéder à un tri le moins arbitraire possible avant le transfert des documents aux Archives nationales.*

## L'information : collecte et gestion des documents

L'information est multiple et ses origines sont diverses : du document administratif ou scientifique à l'ouvrage édité, en passant par les œuvres d'art ou les archives privées et d'entreprises. La collecte de cette information est donc difficile si on la veut exhaustive, dans l'intérêt du public et des chercheurs, et, plus généralement, dans le souci de préserver la mémoire collective. Des règles ont donc été établies pour favoriser au maximum cette collecte, aussi bien en France que dans les autres pays. Ainsi en est-il des règles de versement des archives, de la vaste entreprise de récupération qu'ont représentée les confiscations révolutionnaires en France ou encore des règles de dépôt légal des documents édités.

Outre ces enrichissements « réglementés », les collections publiques s'enrichissent grâce aux dons et legs de collectionneurs privés, bibliophiles ou scientifiques, grâce aux échanges entre établissements, grâce surtout aux achats à titre onéreux des documents édités : livres, périodiques, nouveaux media; enfin, grâce aux relations entre chercheurs ou « par hasard » pour l'importante partie de la documentation, essentiellement scientifique, que l'on qualifie de littérature souterraine : rapports, comptes rendus de recherche, préprints... L'ensemble de ces collections est conservé et traité dans différents types d'établissements : archives, bibliothèques d'étude, de lecture publique ou de recherche, photothèques, diathèques, microthèques, discothèques... ou plus généralement médiathèques; curieusement, en effet, lorsqu'il s'est agi de traiter des documents sur nouveaux supports, on s'est plu à décliner en « thèque » tous les nouveaux types de documents pour désigner les lieux où ils étaient entreposés, généralement d'ailleurs une bibliothèque qui conservait depuis toujours des documents de diverses natures : cartes et plans, monnaies, parchemins, tablettes, papyrus, etc.

L'habitude des documents imprimés a fortement associé les notions de livre et de bibliothèque, bien que le « biblion » n'ait guère eu de point commun, quant à sa forme, avec notre livre. La bibliothèque est de fait un lieu de dépôt de la connaissance, quel que soit le support de celle-ci et même si, pour des raisons de conservation ou de commodité de la consultation, on crée des secteurs spécialisés.

### Les archives

Les archives sont constituées par l'ensemble des documents émis ou rassemblés par un organisme public ou privé, personne physique ou morale, en vue d'une activité particulière. En ce sens, les collections d'archives diffèrent profondément des collections de bibliothèque. Dans cette dernière, en effet, les documents conservés sont choisis et regroupés en fonction de critères extérieurs : philosophie, littérature, science, histoire, etc. Par contre, un fonds d'archives est le reflet de l'activité d'un organisme : qu'il s'agisse d'une société industrielle fabriquant tel ou tel produit, d'un ministère ou d'une cour de justice. L'ensemble de ces documents, comme le classement qui leur a été donné, est par conséquent important et pourra permettre à l'historien d'en déduire l'activité de l'organisme. A l'inverse, la connaissance du fonctionnement de cet organisme facilitera la consultation de ses archives.

L'archiviste n'a pas à trier et classer les documents selon ses vues propres. Il doit en faciliter la recherche et l'accès, mais sans intervenir dans leur ordre et leur présentation.

Dès la plus haute antiquité, en Assyrie, en Égypte, en Grèce et plus tard à Rome, à partir du moment où les hommes ont su consigner sur des matières durables les actes de leur vie sociale, économique, politique ou privée, ils ont éprouvé le besoin de conserver ces documents. Ces archives constituées à des fins utilitaires évidentes nous sont aujourd'hui précieuses pour éclairer les différents aspects de leur histoire. Ainsi, par exemple, les 20 000 tablettes à inscriptions cunéiformes retrouvées avant la guerre à Tell Hariri et conservées au Louvre ont permis la connaissance de la vie à Babylone à l'époque d'Hammourabi, c'est-à-dire vers 1700 avant Jésus-Christ.

Selon les pays, la collecte et le classement des archives furent plus ou moins organisés. Jusqu'au XVIIIe siècle, la notion d'archives publiques n'existe pratiquement pas, et il n'y a guère de différence entre les archives du royaume et celles des particuliers. Ainsi les ministres et secrétaires d'État conservaient les archives liées à leur activité officielle et les transmettaient à leurs héritiers. La notion d'archives d'État, au sens de conservation de documents d'intérêt public, ne s'impose vraiment qu'à la fin du XVIIIe siècle. D'ailleurs, l'intérêt des historiens pour les archives ne s'était précisé qu'aux XVIIe et XVIIIe siècles, époque à laquelle de vastes travaux d'érudition et de compilation avaient été entrepris. C'est ce mouvement d'intérêt qui permettra en France d'organiser les archives sur des bases solides à l'époque révolutionnaire par le décret du 7 messidor an II.

L'organisation actuelle des Archives de France s'inspire très directement des dispositions prises à cette époque. Les dépôts sont constitués au niveau national, départemental et communal, et les administrations y versent leurs documents. Devant la multiplication considérable des documents et avec l'apparition de la notion d'archives-instruments de travail, aussi bien pour l'historien que pour l'administration dont elles sont le produit, les archivistes ont dû modifier leur comportement vis-à-vis des produits qu'ils recevaient. Il est devenu nécessaire de procéder à un tri, le moins arbitraire possible, des documents afin de permettre leur utilisation. En France, dans la plupart des ministères, des archivistes vont trier et classer les documents avant leur transfert aux Archives nationales. Dans le reste du pays, les différents services de l'administration alimentent les dépôts d'archives départementaux ou communaux. Les communes qui n'ont pas de moyens suffisants en personnel et en matériel envoient leurs archives au dépôt départemental. Les archives peuvent également être alimentées par don ou dépôt de personnes physiques ou morales. Dans le cas d'un dépôt, les documents restent la propriété de la personne ou de la société qui les a déposés, qui peut les reprendre, et dont l'autorisation est nécessaire pour une consultation.

Une mention toute particulière doit être faite pour les *archives notariales*. Elles sont, depuis le XIVe siècle, propriété personnelle des notaires. Actuellement encore, les notaires sont tenus de garder leurs minutes pendant 125 ans, après quoi ils sont autorisés à les déposer aux



Doisneau - Rapho

Archives nationales et départementales où, avec leur autorisation, elles pourront être consultées. Elles constituent pour l'historien une source d'informations d'un intérêt considérable.

Les *archives de sécurité* forment une catégorie à part : en effet, elles ne constituent pas un fonds original, mais sont la copie des fonds existants. Les procédés modernes de micrographie permettent en effet la reproduction de tous les documents précieux ou intéressants, à des fins de conservation et parfois de communication. C'est en raison des risques de destruction par incendie ou en cas de guerre que, depuis la dernière guerre, la reproduction des archives sur microfilms a été entreprise, assez systématiquement, dans tous les pays. Le microfilm présente les avantages d'une confection rapide, d'un stockage peu encombrant, d'un transport facile, d'une reproduction aisée. Cela permet, non seulement de préserver l'information contenue dans les archives, mais souvent de la transmettre par envoi de copie de microfilm. Les archives de sécurité sont souvent conservées assez loin de leurs dépôts d'origine.

Nous avons vu précédemment que la conservation matérielle de ces documents à très long terme n'était toutefois pas sans problème. La consultation des archives est facilitée par des instruments de travail confectionnés par les archivistes : inventaires analytiques, fichiers ou tables. Les archives sont à la disposition du public, avec toutefois certaines restrictions dans l'intérêt de l'État ou des particuliers. Un délai, variable suivant les pays et la nature des documents, permet de préserver les secrets d'État ou la vie privée des citoyens. En France, il varie de 50 ans pour la plupart des fonds à 100 ans pour toutes les archives judiciaires et 125 ans pour les archives notariales.

## Les bibliothèques

Les autres lieux de dépôt de l'information sont organisés d'une façon totalement différente. D'une part, les collections y sont constituées à partir d'origines diverses ; elles résultent d'une politique d'acquisitions, donc d'un choix. Le traitement des documents entrés comporte toujours cette sélection, puis une orientation, compte tenu des spécialités de la bibliothèque et non de l'origine du document. La communication, enfin, est toujours possible au public, avec des restrictions cependant pour les centres de documentation d'entreprises en vue de préserver le secret industriel.

Différents types de bibliothèques peuvent être distingués, en fonction parfois, nous l'avons vu, du type de documents qu'elles conservent et communiquent ; mais surtout en fonction des besoins qu'elles sont destinées à satisfaire, et donc des publics qu'elles desservent.

### Bibliothèques nationales

Les bibliothèques nationales occupent une place à part, du fait de l'importance considérable de leurs collections, mais aussi du rôle de « mémoire nationale » qu'elles sont appelées à jouer. Une des sources principales d'accroissement de leurs collections, qui leur permet de jouer ce rôle de reflet ou de conservatoire de la vie culturelle d'un pays, est le dépôt légal.

Le **dépôt légal** a été institué en France par l'ordonnance de Montpellier, en 1537, dans le dessein de rassembler dans la bibliothèque royale « toutes les œuvres dignes d'être vues... pour avoir recours aux dits livres si, de fortune, ils étaient cy après perdus de la mémoire des hommes ou aucunemen immués, ou variés de leur vraye et première publication ». Par la suite, les textes ont lié l'obligation de déposer à la protection des droits de l'auteur. Les modalités du dépôt ont varié en fonction de l'attitude des gouvernements vis-à-vis de la liberté d'expression. L'organisation actuelle du dépôt légal a été fixée par la loi du 21 juin 1943. Le dépôt légal des médailles avait fait l'objet d'une loi spéciale en 1929. La loi de 1943 et ses décrets d'application précisent que sont assujettis au dépôt légal « les imprimés de toutes natures (livres, périodiques, brochures, estampes, gravures, cartes postales illustrées, affiches, cartes de géographie et autres), les œuvres musicales, photographiques, cinématographiques, phonographiques mises publiquement en vente ou en distribution ou cédées pour la reproduction ». Le dépôt doit être effectué par l'imprimeur ou le producteur et par l'éditeur ou toute personne qui en tient lieu (notamment l'auteur s'éditant lui-même). L'imprimeur doit déposer deux exemplaires de chacune des publications qu'il produit à une bibliothèque municipale classée de sa région habilitée à recevoir ce dépôt. L'éditeur doit déposer quatre exemplaires



Ciccione - Rapho

◀ ***Une vue de la salle de lecture de la Bibliothèque nationale à Paris ; créée par Charles V, puis continuellement enrichie depuis 1537 par le dépôt légal, la Bibliothèque nationale compte actuellement plus de 6 500 000 volumes, dont de nombreux ouvrages rares et précieux.***




▲ *La bibliothèque de l'université de Coimbra (Portugal).*

de ses publications à la Bibliothèque nationale et un au ministère de l'Intérieur. Le dépôt légal permet ainsi de collecter la quasi-totalité des documents nationaux et représente une source considérable d'accroissement pour la Bibliothèque nationale et pour un certain nombre d'autres établissements.

L'exemple français a donc inspiré un certain nombre de pays. Ainsi, aux États-Unis, les livres sont obligatoirement enregistrés au Copyright pour la protection du droit d'auteur, mais la Library of Congress ne les conserve pas tous. En U. R. S. S., un dépôt légal de 45 exemplaires alimente la Bibliothèque Lénine, les Archives nationales et un certain nombre d'autres bibliothèques. En Grande-Bretagne, le dépôt au Copyright est obligatoire : le British Museum et un certain nombre d'autres bibliothèques, dont la Bibliothèque nationale d'Édimbourg, peuvent ensuite demander un exemplaire des ouvrages à l'éditeur à titre de dépôt légal. Le dépôt légal a été instauré par une loi en 1965 seulement en Belgique, et la Suisse ne connaît encore qu'un dépôt volontaire des éditeurs. De nombreux pays neufs l'adoptent, car il est considéré sur le plan international, notamment par l'Unesco, comme le moyen de réaliser une bibliographie nationale complète, donc comme l'un des auxiliaires du Contrôle bibliographique universel (C. B. U.) qui devrait permettre de rendre accessible à tous l'ensemble des informations publiées dans le monde.

La Bibliothèque nationale à Paris, le British Museum à Londres, la Library of Congress à Washington et la Bibliothèque Lénine à Moscou sont les plus célèbres et importantes bibliothèques du monde occidental.

La **Bibliothèque nationale** tient son origine de la Bibliothèque royale créée par Charles V. Continuellement enrichie à partir de 1537 par le dépôt légal, elle a ensuite bénéficié de l'extraordinaire apport des confiscations révolutionnaires : plus de 300 000 volumes purent ainsi entrer dans ses collections. Actuellement, 20 000 livres français et 30 000 livres étrangers entrent chaque année dans son fonds, auxquels il faut ajouter quelque 1 200 000 numéros de revues... Ses collections comportent plus de 6 500 000 volumes, dont de nombreux ouvrages rares et précieux : incunables (livres édités avant 1501), reliures précieuses, éditions de luxe. Elle possède en outre 250 000 manuscrits, plusieurs centaines de milliers d'estampes, 12 millions de gravures, 2 millions de photographies, 1 million de documents musicaux, des collections remarquables d'atlas, de cartes, de globes anciens, de monnaies, de médailles et d'objets d'art.

Le **British Museum**, fondé en 1753, est à la fois un grand musée et une importante bibliothèque. La bibliothèque est extrêmement riche : 8 500 000 volumes imprimés, 150 000 manuscrits, importantes collections de musique et de cartes, de monnaies et de médailles.

La **Library of Congress** a été fondée en 1800 pour le Congrès, c'est-à-dire le Parlement américain. Elle est devenue, dans les faits sinon dans la loi, la bibliothèque nationale des États-Unis. Ses collections représentent plus de 55 millions de documents sur tous supports, y compris 3 millions de photographies, de films, de disques, de cartes, etc.

La **Bibliothèque Lénine** à Moscou est la plus récente. Elle a été créée après la révolution de 1917 pour remplacer l'ancienne Bibliothèque impériale. Elle reçoit toutes les publications d'U. R. S. S. et ses collections sont estimées à 25 000 000 de documents.

En dehors de ces très grands établissements, il existe de nombreuses autres bibliothèques dont les vocations sont plus limitées, en tout cas plus définies.

### *Bibliothèques municipales*

Les bibliothèques municipales sont les plus proches, par leur origine et la nature de leurs collections, des bibliothèques nationales. Souvent héritières, en effet, d'un riche passé, leurs collections anciennes contiennent des documents précieux ou rares qui constituent la base de leur fonds d'étude. Elles attirent les historiens et sont souvent le siège de sociétés savantes. Parallèlement à ce rôle, elles ont en général développé des sections modernes orientées vers un plus vaste public.

L'expression « lecture publique » utilisée pour désigner ce type d'activités des bibliothèques exprime une volonté et une qualité nouvelle de service : service d'information générale et professionnelle à destination du plus large public. Le développement de cette orientation nouvelle est possible grâce à une attitude dynamique : information sur l'existence de ces possibilités, animation de la bibliothèque par des expositions ou l'organisation de débats, création d'un cadre agréable où tous les documents seront mis directement à la disposition des lecteurs avec la possibilité de les emprunter, qu'il s'agisse de livres, de revues, de photographies, de films, de diapositives ou de disques. Certains de ces documents présentent des problèmes particuliers de conservation, notamment lorsqu'ils sont prêtés : ainsi les disques risquent d'être dégradés par les manipulations et par les pointes de lecture (saphirs ou diamants) ; on sera donc amené à vérifier systématiquement les pointes de lecture avant le prêt et les disques au moment de leur retour. Ce type de bibliothèque-discothèque, ou de médiathèque, est très répandu dans les pays occidentaux : États-Unis, Canada, Grande-Bretagne, pays scandinaves, Allemagne et aussi en France.

### *Bibliothèques centrales de prêt*

Il existe en France un autre type de bibliothèques publiques : les bibliothèques centrales de prêt (B. C. P.), instituées en 1945. Elles sont créées à la demande des départements pour assurer le développement de la lecture dans les zones à faible densité de peuplement. Elles fonctionnent dans le cadre de chaque département et doivent desservir au moyen de bibliobus les communes de moins de 20 000 habitants. En 1974, elles desservaient 16 512 communes représentant plus de 16 millions d'habitants. Leur rôle s'exerce de deux manières, soit par le dépôt renouvelé de livres dans des annexes, soit par un prêt direct dans le bibliobus, véritable bibliothèque ambulante où les lecteurs peuvent choisir directement sur les rayons les ouvrages et documents qu'ils désirent. Les bibliobus sont d'ailleurs utilisés de la même manière par les bibliothèques municipales des grandes villes pour desservir les quartiers périphériques.

### *Bibliothèques d'université*

C'est un rôle tout différent que sont appelées à jouer les bibliothèques d'université, à mi-chemin entre les bibliothèques publiques et les bibliothèques spécialisées.

Des bibliothèques publiques, elles tiennent leur vocation de service public, désormais largement ouvert, ainsi que leur mission d'aide à la formation permanente et

leur action en faveur du développement de la lecture par l'information et par la formation de leur public à l'utilisation et à la recherche de la documentation. Des bibliothèques spécialisées, elles ont les fonctions d'auxiliaires de la recherche et les collections importantes et de haut niveau. Leur rôle est, en effet, à la fois d'accueillir et de former des étudiants de tous niveaux ainsi qu'un assez large public, et aussi de fournir aux chercheurs les instruments de travail qui leur sont nécessaires. Pour répondre à ce dernier besoin, elles doivent évidemment orienter leur politique d'acquisition, mais surtout offrir des possibilités modernes de recherche documentaire, tâches difficiles mais qu'elles parviennent à remplir efficacement.

***Bibliothèques spécialisées***

Les bibliothèques spécialisées sont le plus souvent rattachées à des laboratoires de recherche publics ou privés. Leur caractère est de n'être pas encyclopédiques, mais limitées à un domaine plus ou moins étendu. Leurs collections sont donc délimitées et présentent souvent un grand intérêt du fait de cette spécialisation. Il n'y a plus aujourd'hui de différence entre un centre de documentation et une bibliothèque de recherche. A l'origine, l'expression avait été créée pour désigner un des aspects de l'activité d'une bibliothèque : la recherche de références, traditionnellement appelée recherche bibliographique, plus souvent désignée aujourd'hui sous le nom de recherche documentaire. Le centre de documentation était donc le lieu où étaient stockées et traitées les références, par opposition à la bibliothèque où étaient traités et stockés les documents eux-mêmes. Par une évolution logique, les centres ont dû recourir aux documents eux-mêmes et donc les acquérir et les traiter, si bien qu'actuellement l'expression « centre de documentation » et le mot « bibliothèque » désignent sensiblement le même type d'établissement et la même qualité de service.

## Conservation, élimination - Coopération entre bibliothèques

Chacun des établissements qui a été décrit a donc une politique d'acquisition particulière. Dans ces conditions et, surtout, à notre époque où le développement du nombre des ouvrages et documents publiés est considérable, il est nécessaire que des relations de prêt entre les divers organismes chargés de la gestion de la documentation puissent se développer. D'autant plus qu'il n'est pas possible de tout conserver partout pour des raisons évidentes de place : les surfaces de stockage sont limitées et, d'une manière générale, l'archivage coûte cher. Nous savons déjà qu'un tri s'opère dans les archives. De la même manière, une sélection s'opère dans les fonds des bibliothèques, qui procèdent à des éliminations. L'élimination est une pratique courante, surtout dans les bibliothèques publiques, et touche essentiellement les ouvrages de lecture courante. Toutefois, il convient de prendre des précautions : il serait en effet extrêmement préjudiciable de détruire des exemplaires uniques d'ouvrages, ou encore des documents qui, sans plus d'intérêt dans leur lieu de dépôt, seraient susceptibles d'en avoir ailleurs. De là sont nées les idées d'échanges (éliminer d'un fonds ne veut pas forcément dire destruction) et surtout de concertation entre les établissements avant une décision d'élimination. Cette concertation est difficile, car la connaissance des fonds des autres établissements n'est pas aisée. Certes, toutes les bibliothèques ont au moins des catalogues sur fiches, et certaines des catalogues imprimés, mais si la consultation de ces derniers est possible à distance, ils sont rarement à jour. Un instrument de travail manque donc à ce niveau.

***Bibliothèques nationales de prêt***

L'idée d'un dépôt dans des bibliothèques de conservation qui pourraient exister au niveau des régions semble donc une solution moyenne intéressante. Le besoin évoqué de connaissance des fonds des divers établissements aux niveaux national et international est également indispensable au prêt inter-bibliothèques. Les difficultés rencontrées pour la localisation des ouvrages ont suscité la naissance de réseaux informatiques de gestion, et ont été à l'origine des créations de bibliothèques nationales de prêt qui présentent des avantages complémentaires.



U.T.C.

▲ ***Les bibliothèques universitaires ont un double rôle, d'une part accueillir les étudiants de tous niveaux ainsi qu'un assez large public, d'autre part fournir aux chercheurs les documents de haut niveau qui leur sont nécessaires (Bibliothèque de l'université de Compiègne ).***

En France, parmi les centres de coopération scientifique qui entoureront la Bibliothèque nationale, on envisage la création d'un Centre national de prêt.

Un des exemples de bibliothèque nationale de prêt les plus intéressants est celui de la British Lending Library Division (B.L.L.D.), installée près de Londres. C'est la première bibliothèque nationale, et la seule fonctionnant actuellement, créée exclusivement pour le prêt. Elle est rattachée directement au Parlement britannique. Son origine remonte à 1916, mais elle existe dans sa forme actuelle depuis 1973. Ses collections se sont constituées progressivement, en étudiant la demande et en partant du principe qu'il fallait acquérir les ouvrages demandés, même s'ils existaient dans d'autres bibliothèques, et non acheter des collections peu demandées sous prétexte de combler des lacunes. Elle sert en outre de dépôt pour les collections éliminées dans les autres bibliothèques. C'est une des raisons du succès de l'expérience. Une autre raison est la qualité du service, extrêmement rapide : la B.L.L.D. n'a pas en effet de lecteurs propres, de telle sorte que ses documents sont toujours disponibles ; le délai de fourniture est donc extrêmement rapide. En 1976, la B.L.L.D. a répondu à 2 500 000 demandes, dont 50 % ont été satisfaites le jour de leur arrivée, 75 % le lendemain...

Ce service est un complément majeur du système de prêt inter-bibliothèques : il permet de décharger l'ensemble des bibliothèques d'une lourde tâche, surtout pour toutes les publications récentes. Il permet aux autres bibliothèques d'exploiter davantage les fonds locaux.

***Catalogues collectifs***

Un autre moyen de favoriser les échanges consiste à faciliter la localisation des ouvrages et collections : donc à constituer des catalogues collectifs. Ceux-ci existent déjà de manière plus ou moins développée, généralement limités aux périodiques, aux niveaux locaux ou régionaux. Une idée nouvelle, rendue possible par le développement de l'informatique, est de constituer des catalogues collectifs nationaux. Leur intérêt est évident pour la localisation des ouvrages, donc pour le prêt inter-bibliothèques, mais aussi pour faciliter les politiques d'éliminations et d'échanges, permettre une politique d'acquisition, et plus généralement, une politique de développement des collections aux niveaux régionaux et nationaux.

Les impératifs liés à la constitution de ces catalogues les amènent à rendre d'autres services : il faut en effet « entrer les données », c'est-à-dire donner au catalogue

l'information dont il a besoin pour identifier les ouvrages et les localiser. L'identification d'un ouvrage se fait à partir du nom de son ou de ses auteurs, de son titre complet et de son adresse bibliographique : nom de son ou de ses éditeurs, lieu et date d'édition. Sa description comporte en outre des éléments concernant le nombre de pages, les illustrations, l'existence d'une bibliographie, etc.

Enfin, il existe un numéro d'identification du document : International Standard Book Number (I.S.B.N.) pour les monographies, et International Standard Serial Number (I.S.S.N.) pour les publications en séries (périodiques, revues, etc.). L'I.S.B.N. et l'I.S.S.N. ont été institués il y a quelques années au plan international pour faciliter l'identification des publications. Ce numéro est en principe inscrit à l'intérieur du volume, au dos de la page de titre. L'ensemble de ces éléments constitue la description ou la notice catalographique d'un ouvrage. Tous les établissements rédigent de telles notices pour leur catalogue propre. C'est cette notice qui devrait être donnée au catalogue collectif.

### *Réseaux de gestion*

L'idée de simplification vient donc immédiatement : pourquoi tous les établissements feraient-ils le même travail, alors qu'il suffit qu'un seul le fasse ? Ces idées sont relativement récentes et ont été développées au départ en Amérique du Nord.

Le premier réseau de ce type a été créé à partir de Colombus, aux États-Unis, dans les années 1970 et est connu sous le nom de Ohio College Library Center **(O.C.L.C.)**. C'est un organisme privé, sans but lucratif, auquel adhèrent des bibliothèques (une centaine actuellement à travers tout le continent nord-américain). Il est organisé de manière à permettre le catalogue collectif partagé en conversationnel et l'édition des catalogues ou la réponse à des questions de localisation.

Au système **O.U.L.C.S.** (Ontario Universities' Library Cooperative System) participent 18 bibliothèques canadiennes. Chacune est reliée par des moyens téléinformatiques à un fichier central. Comme dans l'O.C.L.C., cela leur permet de faire le catalogage en coopération et en mode conversationnel.

Le **R.I.B.** (Réseau informatique des bibliothèques) développé en France par la DICA (Division de la coopération et de l'automatisation du service des bibliothèques du secrétariat d'État aux universités) s'appuie sur les mêmes principes. Le catalogue collectif national est constitué notamment par les notices réalisées par le département des entrées de la Bibliothèque nationale à partir des ouvrages reçus en dépôt légal. Toute la production française figure au fichier et sert en même temps à préparer la bande bibliographique nationale qui pourra être échangée avec les bandes des autres pays : ainsi les données bibliographiques d'un certain nombre de pays pourront être entrées automatiquement dans ce catalogue. Les bibliothèques participant au réseau peuvent interroger le catalogue lorsqu'elles ont à traiter un ouvrage : si celui-ci a déjà été traité, elles obtiennent automatiquement les fiches correspondantes. Si l'ouvrage en question ne figure pas au catalogue national, la première bibliothèque qui le reçoit doit le traiter. C'est cette façon de procéder que l'on appelle catalogage collectif ou catalogage partagé.

Le R.I.B. est en cours de constitution et a commencé à rendre ses premiers services en 1976. Il devra permettre en outre la localisation rapide des documents, puisque, bien sûr, chaque bibliothèque acquérant un ouvrage le signale au catalogue. Le prêt inter-bibliothèques sera ainsi grandement facilité. Au-delà de ces deux apports considérables, le R.I.B. sera un instrument de travail et d'information du plus haut intérêt, aux possibilités d'application multiples. Il sera d'ici à quelques années un auxiliaire inappréciable de la politique d'acquisition et de développement des établissements qui y adhéreront.

## *La communication et l'accès à l'information*

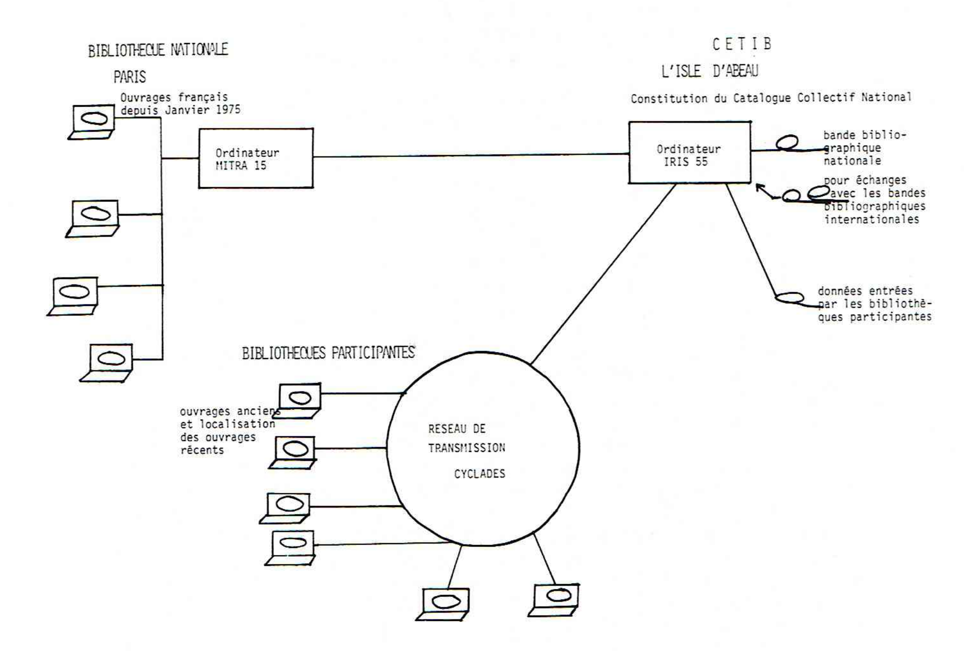
Si l'information, et donc les documents qui la contiennent ou la supportent, est conservée et traitée, c'est dans le seul dessein de la communiquer à des fins d'information, de formation, d'étude ou de recherche : c'est la finalité unique de tous les efforts et de toutes les techniques décrits précédemment. Si ces objectifs étaient oubliés, les bibliothèques ne seraient plus que de riches collections sans intérêt. Cette communication implique le prêt matériel des documents, soit sur place, soit à domicile. La bibliothéconomie moderne a posé les principes du libre accès : les documents, livres, périodiques, disques, copies de diapositives et autres documents iconographiques sont disposés dans des meubles appropriés, en contact direct avec le lecteur qui peut se servir lui-même.

Au-delà de ces aspects matériels de la communication, un problème plus délicat se pose : celui du choix des documents, donc celui de l'orientation de la recherche avec, en corollaire, celui de la recherche bibliographique ou documentaire, et, plus généralement, de la documentation. En effet, à quoi bon se trouver devant plusieurs dizaines de milliers de documents et savoir que l'on peut facilement tous les emprunter si l'on n'a pas le moyen de « s'y retrouver » ? C'est à ce besoin d'orientation du lecteur ou du chercheur qu'ont tenté de répondre divers moyens : cadres de classement, fichiers locaux analytique ou systématique utilisant des classifications de plus en plus sophistiquées, répertoires bibliographiques et, enfin, réseaux documentaires.

### *Cadre de classement*

Le classement des documents est la façon matérielle de les ranger. Les critères peuvent varier : on classe selon l'apparence physique ou selon le contenu. Traditionnellement, l'habitude était de classer les livres par format, par ordre d'entrée dans le fonds. Un tel cadre de classement rend impossible la recherche documentaire, sinon en passant par un catalogue. Les fonds anciens des bibliothèques françaises sont souvent classés de cette manière. L'intérêt de cette méthode était de permettre un gain de place.

Pour les mêmes raisons, jointes à des impératifs au niveau de la conservation, les documents en réserve sont classés par support. Toutefois, il est apparu indispensable, particulièrement dans les établissements s'adressant au grand public, de regrouper en salle de lecture les ouvrages en fonction de leur contenu et non de leur forme. Il a fallu alors imaginer des cadres de classement qui reflètent une certaine logique : chaque établissement, en fonction de son orientation et de son public, a créé son cadre de classement, généralement dérivé, pour les bibliothèques, de la classification de Dewey ou de la classification décimale universelle (C.D.U.).




▼ *L'organigramme du **réseau informatique des bibliothèques (R.I.B.)**; ce réseau est en cours de constitution par la DICA (division de la coopération et de l'automatisation des bibliothèques du secrétariat d'État aux universités) et a commencé à rendre ses premiers services (fourniture automatique de fiches) depuis 1976. Il permettra la constitution du catalogue collectif national et de ce fait la localisation rapide des documents, facilitant ainsi le prêt inter-bibliothèques.*

Le problème de l'intégration ou non des différents types de documents est également posé. La Bibliothèque nationale a choisi de les séparer, sauf dans sa salle des catalogues où périodiques et livres au moins sont intégrés par grands domaines. Par contre, de nouvelles bibliothèques, comme, en France, la bibliothèque-médiathèque de Cambrai ou la Bibliothèque publique d'information du centre Georges-Pompidou à Paris, ont préféré présenter aux lecteurs toute la documentation par thèmes, qu'elle se présente sous forme de livres, de revues, de disques, de films, de diapositives, etc.

## Catalogues et classifications

Il n'en reste pas moins qu'un cadre de classement rend un service limité. Cadre matériel : il ne permet pas d'analyse fine ; la cote portée sur l'ouvrage ne doit comporter, pour des raisons évidentes de commodité de rangement, qu'un nombre limité de caractères, d'autant que la signalisation possible pour orienter le lecteur ne dépasse pas le niveau d'une cote par étagère. Au-delà, le code porté sur l'étiquette n'est plus transparent pour le lecteur et deviendrait donc inutile. Dans ces conditions, un relais doit donc être trouvé : c'est celui des catalogues. Le plus généralement, ces catalogues sont dactylographiés sur fiches : plusieurs fiches sont réalisées pour chaque document afin de permettre la recherche à partir de plusieurs « entrées », que l'on connaisse le nom de l'auteur du document, ou que l'on ait une idée de son contenu. Cela entraîne la réalisation de plusieurs sortes de catalogues qui contiennent chacun l'ensemble des informations liées à l'identification de l'ouvrage.

Les catalogues constituent une information secondaire : une information sur le contenu des documents. S'il est vrai qu'une information est d'autant plus intéressante qu'elle diminue davantage le nombre des possibilités ultérieures de recherche, il est aisé de comprendre que le catalogue le meilleur est celui qui répond le plus exactement à la question posée. Dans ces conditions, l'entrée la plus sûre est l'entrée auteur dont la détermination, à l'exception de certains documents collectifs comme les actes de congrès, ne pose pas de problèmes. La recherche dans ces catalogues, de même que dans les catalogues classés par titres, est aisée et assurée, mais possible seulement lorsque le chercheur connaît l'un ou l'autre de ces éléments, ce qui est rare. Le plus souvent, on recherche des informations sur un sujet donné sans avoir d'idées quant à leurs auteurs ou leurs titres éventuels. Or la réalisation et la consultation de catalogues dont l'entrée est établie en fonction du contenu des documents sont plus délicates.

Plusieurs moyens ont été imaginés qui, tous, essaient de résoudre un problème philosophique fondamental, plus précisément logique : celui d'une perception et de l'expression par un système de l'ensemble de la connaissance. En matière de logique formelle, le monde occidental doit beaucoup à l'Antiquité classique. Ainsi, nous avons appris, en regard de l'objet de la connaissance, à distinguer parmi ce qui nous entoure des *classes* : ensembles d'objets, d'être animés ou d'idées possédant une caractéristique commune. Cette notion de caractéristique est essentielle, puisque son choix détermine la nature d'une classification. L'opération élémentaire de la logique formelle, la dichotomie, est le choix d'une caractéristique et la distinction des objets à classer selon qu'ils possèdent ou non cette caractéristique. A chaque étape de la division, on ajoute ainsi un terme précis au terme général, et la classe se divise à partir de ce caractère.

La classification traditionnelle s'établit ainsi, partant du terme générique vers le terme spécifique, en suivant une stricte hiérarchie. La notion même de classification est fortement liée à l'abstraction. Distinguer une caractéristique, c'est forcément écarter les autres : l'arbitraire est évident, mais tout aussi inévitable. A l'écart de la logique antique, le développement des mathématiques et des sciences expérimentales a assuré une nouvelle forme de rationalisme. De nos jours, à la logique formelle de type classique se substitue la logistique qui s'éloigne du langage traditionnel et donne lieu à une multiplicité de systèmes propres à telle ou telle forme de la connaissance scientifique.

Les systèmes philosophiques susceptibles de représenter la connaissance sont très nombreux, depuis l'« arbre de Porphyre » jusqu'au *Trivium* et au *Quadrivium* de la philosophie scolastique et aux systèmes plus récents de philosophes ou de savants tels que Bacon, Kant, Leibniz, Hegel, Ampère ou encore Auguste Comte. Leur élaboration repose sur l'idée qu'il existe un ordre des sciences conforme à la raison. L'idée d'adapter de tels systèmes à la classification de documents est ancienne, malgré la difficulté que cela peut représenter. En effet, la classification des sciences est déjà extrêmement délicate du fait des multiples liens logiques existant entre les disciplines. Cette difficulté est accrue lorsqu'il s'agit de classer des informations qui peuvent traiter en même temps de plusieurs domaines de la connaissance. C'est ce qui fait la difficulté majeure de l'utilisation de classifications, même simplifiées, comme cadres de classement : la solution possible est l'acquisition du document en exemplaires multiples ou, bien sûr, le recours au catalogue. Les classifications classiques reposent sur le principe essentiel d'une conception de la connaissance en tant que tout formant une unité, un tronc, dont les différents domaines constituent les branches. A cette conception hiérarchique répond un système de codage qui utilise les chiffres ou une combinaison de chiffres et de lettres. Le code de ces classifications dites numériques ou alphanumériques emploie en outre différents symboles, tels que les points, les parenthèses, ou les signes mathématiques : +, —, /, etc. Parmi les plus connues et les plus utilisées se trouvent les classifications décimales : celle de Dewey et la classification décimale universelle dite C.D.U.



Viva - J. Minassian

▲ ***Dans les nouvelles bibliothèques comme celle du centre Georges-Pompidou à Paris, toute la documentation est présentée par thèmes, qu'elle se présente sous forme de livres, de revues, de disques, de diapositives, etc.***

### Classification de Dewey

C'est aux États-Unis à la fin du XIXe siècle, en même temps que la classification du Congrès imaginée pour répondre aux besoins en ce domaine de la Library of Congress, qu'est née l'idée de la notation décimale, avec la classification de Melvil Dewey, bibliothécaire de l'État de New York.

Le schéma général de cette classification n'est pas nouveau, toujours fondé sur l'arbre de la connaissance : la connaissance est un tout, symbolisé par le chiffre 1. Chacune des branches est donc une fraction de ce chiffre, elle-même symbolisée par un chiffre, ce qui




▲ *La bibliothèque de l'abbaye bénédictine d'Admont en Styrie (Autriche); construite en 1774, elle est richement décorée de fresques et de sculptures.*

permet de créer dix branches principales qui pourront se subdiviser chacune en autant de ramifications et ainsi de suite... Le chiffre 1, symbole de la connaissance, n'apparaît pas dans l'indice. Pour bien comprendre, il faut cependant considérer les indices comme des fractions de 1 et donc imaginer devant le code chiffré un « 0 »; le mécanisme de décomposition devient alors évident. Les dix branches principales appelées *classes* sont :

000 Généralités
100 Philosophie
200 Religion
300 Sciences sociales
400 Langage
500 Sciences exactes
600 Sciences appliquées
700 Arts
800 Littérature et composition littéraire
900 Géographie - Histoire générale.
Les subdivisions se font de la façon suivante, par exemple :
600 Sciences appliquées
630 Agriculture
631 Exploitations agricoles
631.5 Cultures
631.51 Préparation du sol.

Un autre intérêt de cette classification réside dans son caractère mnémotechnique, grâce à l'utilisation pour la subdivision des autres sujets des chiffres de la classe histoire-géographie; ainsi dans la classe 900 :
940 Histoire de l'Europe
944 Histoire de la France.
En combinant, on pourra obtenir :
700 Art
709 Histoire de l'art
709.4 Histoire de l'art en Europe
709.44 Histoire de l'art en France.

Ce sont ces côtés extrêmement pratiques, permettant de substituer un ordre relatif à un ordre fixe, qui expliquent les succès de cette classification, longtemps utilisée, non seulement pour la recherche, mais surtout, dans sa forme simplifiée, comme cadre de classement des ouvrages aux États-Unis, en Amérique latine, en Asie, en Afrique et en Europe. En France, elle est généralement employée dans les bibliothèques publiques.

**Classification décimale universelle (C.D.U.)**

La classification décimale universelle a été inventée par deux juristes belges, Henri-Marie La Fontaine et Paul Otlet, au début du XXe siècle; son développement et ses mises à jour sont assurés par la Fédération internationale de documentation. Elle est largement inspirée de la classification de Dewey dont elle a conservé les grandes classes et, bien sûr, le principe de la notation décimale. Toutefois, dans le détail, elle en diffère sensiblement. Ainsi, le principe de la notation à trois chiffres, s'il est maintenu pour la séparation des indices longs, n'est pas absolu pour les notations courtes : seuls sont inscrits les chiffres significatifs. Par exemple :
0 Généralités
1 Philosophie
2 Religion
...
5 Sciences
51 Mathématiques
511 Arithmétique - Théorie des nombres
511.5 Analyse indéterminée d'ordre supérieur premier.

Mais l'originalité de la C.D.U. repose surtout sur la création de connexions et de subdivisions communes dont la lecture est facilitée par l'introduction de signes mathématiques ou de ponctuation aux côtés des chiffres. Parmi les signes de connexions, le signe « + » signale l'addition de deux disciplines (7 + 11 : art et métaphysique), le signe « : » établit une relation entre deux domaines (7 : 17 : les rapports de l'art et de la morale). Parmi les subdivisions communes, on peut signaler :
les « = » introduisant la notion de langue (= 40 le français; ainsi 973 = 40 signalera un document sur l'histoire des États-Unis écrit en français);
les « () » signalant les lieux; ainsi une étude sur l'art en France sera signalée par 7 (44);
les „«»'' indiquant le temps. L'art en France du XIIe à la fin du XIVe siècle s'écrira 7 (44) « 1100-1399 »; etc.

Les possibilités de notation de la C.D.U. font qu'elle est, dans sa forme développée, assez adaptée à la constitution de catalogues systématiques sur fiches, mais assez peu au classement matériel de volumes. Elle est surtout utilisée en Europe et dans les bibliothèques d'université ou de recherche. Malgré ses avantages, elle reste handicapée par la rigidité de sa construction hiérarchique et par les limites du cadre décimal. De nouveaux systèmes ont donc été imaginés, particulièrement à l'intention des bibliothèques spécialisées, comme le système de Henry Evelyn Bliss, autre bibliothécaire américain, ou celui de S. R. Ranganathan qui fut professeur de mathématiques, avant d'être bibliothécaire à Madras puis à l'université de Delhi.

65 BES BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? / Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod, 1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de l'entreprise ; 142.)

F 4404

65.011

65 BES BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? / Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod, 1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de l'entreprise ; 142.)

F 4404

Jaoui (Hubert)

65 BES BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? / Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod, 1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de l'entreprise ; 142.)

F 4404

Créativité

65 BES BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? / Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod, 1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de l'entreprise ; 142.)

F 4404

Entreprise; créativité

65 BES BESSIS (Pierre). - Qu'est-ce-que la créativité ? / Pierre Bessis, Hubert Jaoui. - Paris : Dunod, 1972. - VII - 116 p. ; 18 cm. - (La Vie de l'entreprise ; 142.)

F 4404

◀ ***Le plus souvent, les catalogues des bibliothèques sont dactylographiés sur fiches; plusieurs fiches sont réalisées pour chaque document afin de permettre la recherche à partir de plusieurs « entrées », que l'on connaisse le nom de l'auteur du document ou que l'on ait une idée de son contenu; de haut en bas respectivement, sont représentées 5 fiches établies selon la norme internationale ou International Standard Book's Description (I. S. B. D.) :***
***— une fiche auteur (le nom de l'auteur est en vedette) destinée au catalogue auteur;***
***— une fiche où un indice (65.011) établi selon la classification décimale universelle (C.D.U.) est mis en vedette; la cote topographique (65) est également établie selon la C.D.U. mais dans une version simplifiée; cette fiche sert à l'établissement du catalogue systématique;***
***— une fiche mettant en évidence le nom du 2e auteur; elle entre au catalogue auteur;***
***— une fiche matière (un mot matière ou mot clef est mis en vedette); cette fiche sert à l'établissement du catalogue matière ou analytique;***
***— une autre fiche matière; un même ouvrage peut en effet nécessiter plusieurs entrées dans un même catalogue.***

**Colon classification**

La Colon classification a été élaborée par Ranganathan avec deux soucis principaux : celui d'une analyse exhaustive des documents en tenant compte de tous leurs aspects, et celui de la précision dans la notation des concepts spécifiques. Il en découle la suppression de « l'arbre de la connaissance » et des subdivisions hiérarchiques. Le nouveau raisonnement se fonde sur des domaines d'étude qui ne peuvent supporter de subdivisions, puisqu'ils représentent plusieurs aspects parallèles, plusieurs *facettes*, sans hiérarchie. Il existe vingt-six domaines d'étude, assez classiques. Ces domaines sont les *foci* (les foyers). Chacun d'entre eux peut être étudié sous un grand nombre de facettes groupées en cinq catégories : Temps, Matière, Personnalité, Énergie, Lieu. Ainsi, la littérature pourra être analysée sous l'aspect de son époque, de sa forme (poésie...), de son auteur ou de son lieu d'origine. Ranganathan expose les principes de sa classification de la façon suivante : « Dans la C.C. il n'existe pas d'indices préfabriqués correspondant à un sujet. On pourrait dire que les tables de la C.C. comportent un certain nombre d'unités standards. Ces unités correspondent aux pièces d'un mécano... En combinant les indices tirés des différentes tables unitaires... les indices correspondant à tous les objets possibles peuvent être construits. Dans ce système la fonction des... symboles de connexion correspond à celle que jouent les boulons dans un système de mécano. C'est donc une classification analytico-synthétique. » Ce système permet une analyse fine et précise, qui se traduit par une notation extrêmement longue et totalement hermétique pour le lecteur.

## Du catalogue matière au thesaurus

Les inconvénients du langage codé ont donc amené à reconsidérer les méthodes traditionnelles d'analyse en langage naturel. La méthode la plus couramment et la plus anciennement utilisée pour la description du contenu des documents est celle du catalogue matière : le bibliothécaire ou le documentaliste, après analyse de l'ouvrage, met en vedette quelques mots caractérisant son contenu. Une certaine hiérarchie peut exister dans ce catalogue : la vedette peut être complétée par une ou des « sous-vedettes » qui la précisent :

Ex. : Aliment, conservation.

Elle peut en outre mettre en relation deux matières lorsque le document établit un rapport entre les deux :

Ex. : Mathématiques/Physique.

Bien entendu, plusieurs entrées au catalogue matière peuvent être créées pour un même document lorsque celui-ci traite successivement de plusieurs sujets :

Ex. : Algèbre Arithmétique Géométrie.

Ce mode de traitement de l'information par mots clefs a l'avantage d'une extrême souplesse, puisque toute notion nouvelle peut y entrer couramment, mais a l'inconvénient d'une extrême subjectivité. En outre, il manque de précision du fait des sens très différents que peuvent avoir les mots (exemples : culture, circulation...) et du fait aussi que tous les termes ne sont évidemment pas utilisés, si bien que celui qui recherche une information à partir des mots dont il a l'habitude de se servir risque de ne pas la trouver sous d'autres termes. D'autre part, la grande richesse du langage naturel fait qu'il existe beaucoup de mots synonymes ou « quasi synonymes », ce qui entraîne une dispersion de l'information sur des notions exprimées par des termes différents. De plus, l'information ainsi donnée est incomplète du fait de l'absence de liens sémantiques, suggérés seulement par des renvois d'un terme à un autre, et du manque de liens hiérarchiques. Enfin, l'information peut être déformée du fait de la non-existence d'une syntaxe. Prenons l'exemple classique du « chat de ma mère »; on mettra en vedette les mots « mère, chat », ce qui donne deux interprétations possibles.

C'est à partir de ces observations sur les catalogues matières et d'une appréciation de la rigueur logique des classifications que l'idée est venue d'organiser le langage utilisé pour la recherche documentaire. Cette organisation a pour but d'améliorer la qualité de la recherche en précisant le langage employé. A cette fin, on élimine les synonymes et on constitue des lexiques qui fixent le sens dans lequel les termes sont employés ainsi que des lexiques de « termes manquants ». Au-delà du vocabulaire, on crée entre les termes des liens sémantiques et parfois hiérarchiques ainsi qu'une syntaxe. Le résultat de cette organisation du langage se matérialise par une sorte de lexique appelé *thesaurus* dont les règles de confection sont normalisées sur le plan international. Les thesaurus sont spécialisés dans un domaine particulier; les premiers ont été scientifiques et en langue anglaise; actuellement ils sont de plus en plus souvent multilingues.

## Recherche documentaire en dehors d'un fonds local

L'ensemble de ces moyens, des classifications aux thesaurus, constitue un auxiliaire indispensable à l'orientation du lecteur et à la recherche documentaire. Ils permettent, face à une collection donnée de documents,

de retrouver celui (ou ceux) qui intéresse tel ou tel utilisateur. Toutefois, la recherche se trouve limitée aux documents appartenant à cette collection. Or les exigences du public, et particulièrement des chercheurs, vont au-delà. Il est nécessaire de pouvoir effectuer une recherche, non seulement dans le fonds d'un établissement, mais dans la totalité des documents parus dans le monde. Différents moyens permettent de répondre à cette exigence.

### *Bibliographies*

Les répertoires bibliographiques, ou bibliographies, sont apparus très tôt. Il s'agit d'ouvrages recensant les titres de documents et procurant une information plus ou moins précise sur ces derniers. La première nomenclature imprimée de titres de livres a été publiée en 1494 à Bâle sous le titre de *Liber de scriptoribus ecclesiasticis :* œuvre de Jean Trithème, elle recensait les écrits d'auteurs ecclésiastiques. Selon la nature des documents qui y sont recensés, les répertoires bibliographiques peuvent être nationaux ou internationaux, généraux, c'est-à-dire traitant de tous les sujets, ou spécialisés dans une seule matière.

Selon leurs caractéristiques de conception et de présentation, un certain nombre de critères de définitions ont été établis. Ils sont « primaires » lorsque les notices de signalement ont été rédigées à la vue du texte lui-même, et « secondaires » lorsque ces notices ont été extraites de bibliographies primaires. Selon le contenu de la notice, on dit qu'ils sont : signalétiques si seuls sont mentionnés les éléments d'identification de l'ouvrage; descriptifs lorsqu'une description matérielle de la présentation et des illustrations complète cette information; analytiques quand une analyse ou un résumé du texte du document sont joints; critiques lorsque cette analyse comporte des appréciations de valeur. En outre, les bibliographies sont exhaustives lorsque les documents concernant le domaine choisi sont tous cités, ou sélectives lorsqu'un choix des documents est opéré en fonction de critères de valeur ou de niveau par exemple.

Enfin, les répertoires sont dits rétrospectifs lorsqu'ils recensent des ouvrages sur une période plus ancienne que l'année en cours et périodiques ou courants lorsqu'ils mentionnent des documents récents. Ce dernier type de bibliographie paraît toujours sous la forme d'une revue : les bibliographies nationales courantes en sont l'illustration la plus connue. En France, la *Bibliographie de la France/Biblio* est produite automatiquement à partir des notices entrées dans le catalogue collectif national à la Bibliothèque nationale. Elle signale chaque semaine tous les titres nouvellement parus et dont le dépôt légal a été effectué.

Les répertoires de ce genre concernent essentiellement les documents sur papier : livres, thèses, publications officielles et administratives, cartes et plans, gravures, estampes et photographies, partitions de musique, périodiques et articles de périodiques. La masse des publications contemporaines pose cependant un problème sérieux : quoique de plus en plus finement spécialisés, ces répertoires voient s'accroître les délais entre la parution des documents et le moment où ils les signalent, cela à une époque où, justement, les exigences en matière de rapidité de l'information sont impératives à tous les niveaux et particulièrement dans les domaines scientifiques.

Les problèmes posés par l'explosion documentaire depuis l'après-guerre ne peuvent plus être résolus par des moyens traditionnels : quelques chiffres donnent une idée de l'ampleur de ce phénomène, qui touche particulièrement les domaines scientifiques. Une estimation de l'Unesco fixe à une centaine le nombre des périodiques scientifiques existant en 1800. Ce chiffre est passé à 1 000 vers 1850, il dépassait les 10 000 vers 1900 pour atteindre aujourd'hui 100 000 titres. Dans le seul domaine de la chimie, on estime qu'il existe actuellement plus de 13 000 revues d'un intérêt certain. Au total, 10 millions de documents paraissent chaque année, et cet ensemble s'accroît de 4 à 5 % par an. L'énoncé de ces chiffres amène deux constatations : une bibliothèque, si riche soit-elle, ne peut plus tout posséder; un chercheur ne peut plus tout lire. Dans ces conditions, il est nécessaire de mettre en commun les ressources documentaires et d'aider à l'analyse et à la sélection de l'information.

### *Réseaux documentaires*

C'est à ces deux impératifs que l'on a tenté de répondre par la constitution des réseaux documentaires, qui représentent un nouvel aspect de la coopération entre bibliothèques ou centres de documentation : il ne s'agit plus d'échanger des services ou les documents eux-mêmes, comme dans le cas des réseaux de gestion, mais des informations sur l'existence et, surtout, sur le contenu des documents. Plusieurs types peuvent être distingués en fonction de leur organisation.

L'exemple type du réseau très centralisé est le *Chemical Abstracts Service* (C.A.S.) qui constitue une gigantesque unité de production. Il emploie, en effet, à Colombus, dans l'Ohio, aux U. S. A., plus de 1 000 employés. Il dépouille 12 000 périodiques en provenance de plus de 100 pays et publiés en 54 langues. Il examine en outre les brevets déposés dans 25 pays. Grâce aux quelque 3 300 analystes du monde entier dont il utilise les services, il effectue annuellement l'analyse de 200 000 documents et de 70 000 brevets. Toute l'information est centralisée à Colombus et traitée par des moyens informatiques en vue de la diffusion de différents types de revues, dont les *Chemical Titles :* index bibliographique bimensuel qui signale rapidement les documents en limitant l'information sur leur contenu à un index KWIC (Keyword in Context), réalisé par une sélection automatique de mots clefs à partir des mots contenus dans le titre des documents.

Le C.A.S. diffuse également d'autres revues, dont la plus célèbre est *Chemical Abstracts,* hebdomadaire qui donne une analyse substantielle des articles. Et surtout, il met maintenant à la disposition des utilisateurs le contenu de ses fichiers en accès direct et conversationnel grâce à la téléinformatique.

L'organisation du réseau MEDLINE est moins centralisée et fait appel à la collaboration de centres extérieurs. Depuis 1964, la National Library of Medecine (N.L.M.), dans le Maryland, aux U. S. A., a mis au point un système de recherche documentaire automatisé dénommé MEDLARS (Medical Litterature Analysis and Retrieval System) qui permet la recherche dans un fonds spécialisé d'un million et demi de documents, s'accroissant chaque année de 200 000 textes nouveaux, extraits de près de 3 000 périodiques du monde entier. Très rapidement, les utilisateurs du monde entier se sont adressés au centre MEDLARS. Aussi, dès 1967, la N.L.M. entreprit de se décentraliser en créant des centres aux États-Unis (actuellement, on en compte 13), puis au niveau international. Cette décentralisation, d'abord limitée à la recherche bibliographique, est maintenant étendue au dépouillement et à l'analyse des documents. Chaque centre national traite ainsi la littérature biomédicale de son pays. En France, c'est le centre de documentation de l'INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale) qui assure cette fonction.

Le réseau a connu, à partir de 1971, un nouveau développement grâce au système MEDLINE (MEDLARS on Line) qui permet désormais l'accès instantané, en mode conversationnel, aux articles de 1 100 périodiques médicaux mondiaux à partir de terminaux d'ordinateur. Le réseau MEDLARS est fondé ainsi sur le principe du partage des tâches et des responsabilités, avec toutefois une direction à la N.L.M. où est installé l'ordinateur central auquel les centres accèdent par téléphone ou par télex.

Le réseau INIS (International Nuclear Information System) est, lui, encore plus complètement décentralisé et représente le dernier type qui sera présenté ici. Ce réseau international de documentation nucléaire est le premier à se fonder sur la participation active de la quasi-totalité des pays du monde. Le développement d'un tel réseau n'a été possible que dans un climat politique de détente; c'est l'Agence internationale de l'énergie atomique qui en a été le support à partir de 1968.

La Section INIS est située à la Division de l'information scientifique et technique de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Elle est le point central, localisé à Vienne en Autriche, et a la responsabilité du bon fonctionnement de l'ensemble : elle assure donc la mise à jour des documents de référence (thesaurus, listes des organismes et laboratoires, listes des titres de périodiques...), elle vérifie toutes les entrées des pays membres et leur fait faire les corrections nécessaires; enfin elle

## Recon Bibliographic File Summary

| File n° | File name | Supplier | Abstract Journal | Subject coverage | Time span | N° refs dec 1975 | N° refs yearly | Update | Abstracts |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | NASA | National Aeronautics and Space Administration, U.S.A. | Scientific and technical Aerospace Reports (STAR); International Aerospace Abstracts (IAA) | Multidisciplinary; science/technology; aerospace; materials; electronics. | 1962 | 765 000 | 65 000 | Monthly | No |
| 2 | CHEMABS | Chemical Abstracts Service, U.S.A. | Chemical Abstracts | Biochemistry; organic macromolecular, applied, physical, analytic chemistry; chemical engineering. | 1969 | 2 005 000 | 400 000 | Quarterly | No |
| 3 | METADEX | American Society for Métals, U.S.A. | Metals Abstracts | Applied/theoretical metallurgy; properties of metals/alloys. | 1969 | 187 000 | 30 000 | Monthly | No |
| 4 | COMPENDEX | Engineering Index Inc., U.S.A. | Engineering Index | Civil, electrical, mechanical, metallurgical, engineering; electronics. | 1969 | 450 000 | 110 000 | Monthly | Yes |
| 6 | NTIS | National Technical Information Service U.S.A. | Governments Reports Announcements. | Multidisciplinary; science/technology. | 1970 | 186 000 | 60 000 | Monthly | No |
| 7 | NUCLEAR | Energy Research and Development Agency, U.S.A. | Nuclear Science Abstracts | Multidisciplinary; nuclear science/technology; physics. | 1968 | 480 000 | 60 000 | Monthly | No |
| 8 | INSPEC | Institute of Electrical Engineers, G.B. | Physics Abstracts; Electrical Engineering and Electronics Abstracts; Computer and Control Abstracts | Multidisciplinary; physics; electrical engineering; electronics; computers; control; automation. | 1971 | 650 000 | 140 000 | Monthly | Yes |
| 9 | ALUMINIUM | American Society for Metals, U.S.A. | World Aluminium Abstracts | Aluminium science, technology, applications. | 1968 | 45 000 | 6 000 | Monthly | Yes |
| 11 | ENVIRON | Environment Information Center, U.S.A. | Environment Abstracts | Environmental engineering; energy; pollution; resources. | 1971 | 48 000 | 18 000 | Monthly | No |
| 17 | ISI | Institute for Scientific Information, U.S.A. | Science Citation Index | Physical, chemical, engineering sciences. | 1972 | 560 000 | 160 000 | Monthly | No |

▲ ***Les principaux fichiers documentaires européens que l'on peut interroger en direct à Frascati grâce au réseau de l'agence spatiale européenne (A.S.E.).***

fabrique et diffuse les produits qui sont de trois catégories, dont les documents imprimés comme la revue bibliographique *INIS Atomindex* et les documents de référence. Le deuxième type de produits est constitué par la « bibliothèque » d'INIS sous forme de microfiches qui permet la diffusion de tous les résumés et du texte des documents rares.

Enfin INIS produit des bandes magnétiques contenant ses fichiers complets, diffusées chaque mois gratuitement aux centres nationaux qui les demandent. Le correspondant français d'INIS est le Centre d'études nucléaires de Saclay. La section INIS de Vienne a donc uniquement un rôle de coordination. L'alimentation du fichier est assurée par les pays membres qui dépouillent et analysent chacun la documentation nationale et entrent directement l'information dans le système en respectant des règles strictes de traitement. En effet, plus le fonctionnement d'un réseau est décentralisé, plus la normalisation du traitement doit être précise et rigoureusement appliquée.

### *Banques de données*

La description de ces différents réseaux amène à formuler quelques remarques permettant de définir leurs caractéristiques essentielles. En effet, quel que soit le type de leur organisation ou la nature des documents qu'ils produisent, le fondement des réseaux documentaires est la constitution d'une banque de données, autrement dit l'accumulation d'une masse d'informations. La nature des informations rassemblées détermine trois types de banques de données : celles qui contiennent les données elles-mêmes et sont à même de fournir une réponse directe à une question précise (par exemple, en France, la banque ARIANE qui fournit des réponses précises à des questions touchant les techniques du bâtiment) ; celles qui contiennent des références bibliographiques, qui sont les plus nombreuses et que l'on appelle en général, en France, les bases de données ; celles qui fournissent les textes mêmes des documents.

Ces informations devront être traitées en vue de leur diffusion générale vers d'autres centres, ou sélective vers des laboratoires spécialisés ou vers des chercheurs. Pour répondre aux impératifs de rapidité et de précision, ce traitement ne peut être envisagé que d'une manière automatisée, donc fondé sur l'utilisation d'un système informatique ; c'est là sa deuxième caractéristique.

Enfin, si la diffusion par publications périodiques ou microfiches se poursuit, la tendance est de plus en plus (ce sera la troisième caractéristique que nous retiendrons) à l'utilisation des possibilités d'interrogation directe des fichiers offertes par le développement de la téléinforma-



E. Lessing - Magnum

▲ *La conservation de l'information est aussi réalisée par les musées et galeries de peinture ; ici, une peinture de David Teniers le Jeune (1655) représentant l'archiduc Léopold-Guillaume contemplant les tableaux de sa galerie de Bruxelles (Kunsthistorisches Museum, Vienne, Autriche).*

tique. Cette interrogation en conversationnel se fait par l'intermédiaire d'un terminal muni d'un écran de visualisation et d'une imprimante reliée à l'ordinateur central qui peut être fort éloigné. Ainsi, de n'importe quelle bibliothèque de France équipée pour de telles recherches, comme, pour ne citer que quelques exemples, la bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg, celles de l'université de Rennes ou de Nice, on peut accéder à l'ordinateur de l'Agence spatiale européenne à Frascati, près de Rome, qui contient notamment les fichiers CHEMABS (Chemical Abstracts), N. A. S. A., PASCAL du C. N. R. S., et ceux de neuf autres banques de données scientifiques représentant un total de 6 500 000 références.

Certaines bibliothèques, comme celles de l'université de Paris-Sud ou de l'université de technologie de Compiègne, donnent de plus accès aux banques et bases de données américaines de Lockheed Missil System (L.M.S.) et de System Development Corporation (S.D.C.) : c'est ainsi l'ensemble des publications mondiales qui est mis à la disposition de leur public.

On pourra en outre prochainement accéder aux banques et aux bases de données françaises comme ARIANE (bâtiment), THERMODATA (physico-chimie métallurgique), BIAM (médicaments), SABIR (recherche contre le cancer), TITUS (textile), aux bases de données du Bureau national de la météorologie, du Bureau des recherches géologiques et minières, du Centre de documentation de l'armement, du Centre national d'études des télécommunications, du Centre national pour l'exploitation des océans, du Centre national de la recherche scientifique dans le domaine biomédical, de l'Institut national de la recherche agronomique, etc.

### Toute l'information accessible à tous

L'essor des réseaux documentaires a rendu indispensable la normalisation du traitement de l'information au niveau international. C'est ce à quoi s'est employé l'ISO (International Standardisation Organisation), organisme international de normalisation. Ces efforts ont été vigoureusement encouragés par l'Unesco, qui a élaboré le programme UNISIST dans le dessein de favoriser la circulation de l'information.

L'ensemble de ces efforts a abouti à la création et au développement de réseaux documentaires spécialisés comme INIS ou AGRIS (domaine de l'agriculture), mais aussi à un début de contrôle bibliographique universel par la constitution, dans un certain nombre de pays, de banques de données nationales et par la création d'un code international d'identification des documents, grâce à l'International Standard Book Number et à l'International Standard Serial Number. Ainsi, des efforts conjugués et concrets et l'utilisation de techniques modernes adaptées devraient permettre de reprendre ou de garder le contrôle de l'ensemble de l'information produite dans le monde, malgré son expansion considérable, avec l'unique objectif de la rendre accessible à chacun.

## BIBLIOGRAPHIE

CHAUMIER J., *Systèmes informatiques de documentation,* Paris, Entreprise Moderne d'Édition, 1972, 116 p. - COMTE H., *Les Bibliothèques publiques en France,* Villeurbanne, Presses de l'École Nationale Supérieure de Bibliothécaires, 1977, 447 p. - FAVIER J., *Les Archives,* Paris, Presses Universitaires de France, 1975, 124 p., Que sais-je ?, n° 805. - FLIEDER F., *La conservation des documents graphiques, recherches expérimentales,* Paris, Eyrolles, 1969, 288 p., Travaux et publications du Centre international d'études pour la conservation des biens culturels et du Comité de l'ICOM pour les laboratoires de Musées, volume IX. - MARTIN H.-J., *Le Livre et la civilisation écrite,* Paris, École Nationale Supérieure de Bibliothécaires, 1968, t. 1 et 3, 190 + 209 p. - *Réseaux et systèmes de documentation,* Paris, Gauthier-Villars, 1975, 347 p., Documentation et information.

# DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les cours sur l'intelligence artificielle se généralisent actuellement dans les universités américaines; il existe un journal scientifique consacré à ce sujet, et nombreuses sont les conférences dans divers pays du monde. Le sujet ainsi nommé, « intelligence artificielle », est assez difficile à définir; on peut y inclure les rubriques suivantes : démonstration des théorèmes, prise de décision, résolution de problèmes, reconnaissance de formes, adaptation, création de langages naturels. Les mots « intelligence » et « artificielle » sont d'ailleurs assez mal regroupés dans cette expression, car il faudrait savoir ce qu'intelligence veut dire. Les psychologues utilisent une définition plutôt pragmatique : l'intelligence est l'entité que mesurent les tests... d'intelligence ! En fait, nous pensons qu'il ne faut pas attacher au vocable une importance qu'il n'a pas. Suivant le schéma proposé par Earl B. Hunt, nous placerons dans l' « intelligence artificielle » tous les domaines répertoriés ci-dessus en écartant toute discussion philosophique sur l'intelligence des machines. Dans cette partie, nous ne traiterons pas de manière exhaustive tous ces sujets; nous nous contenterons d'en indiquer le but, et nous consacrerons un développement plus complet à deux d'entre eux.

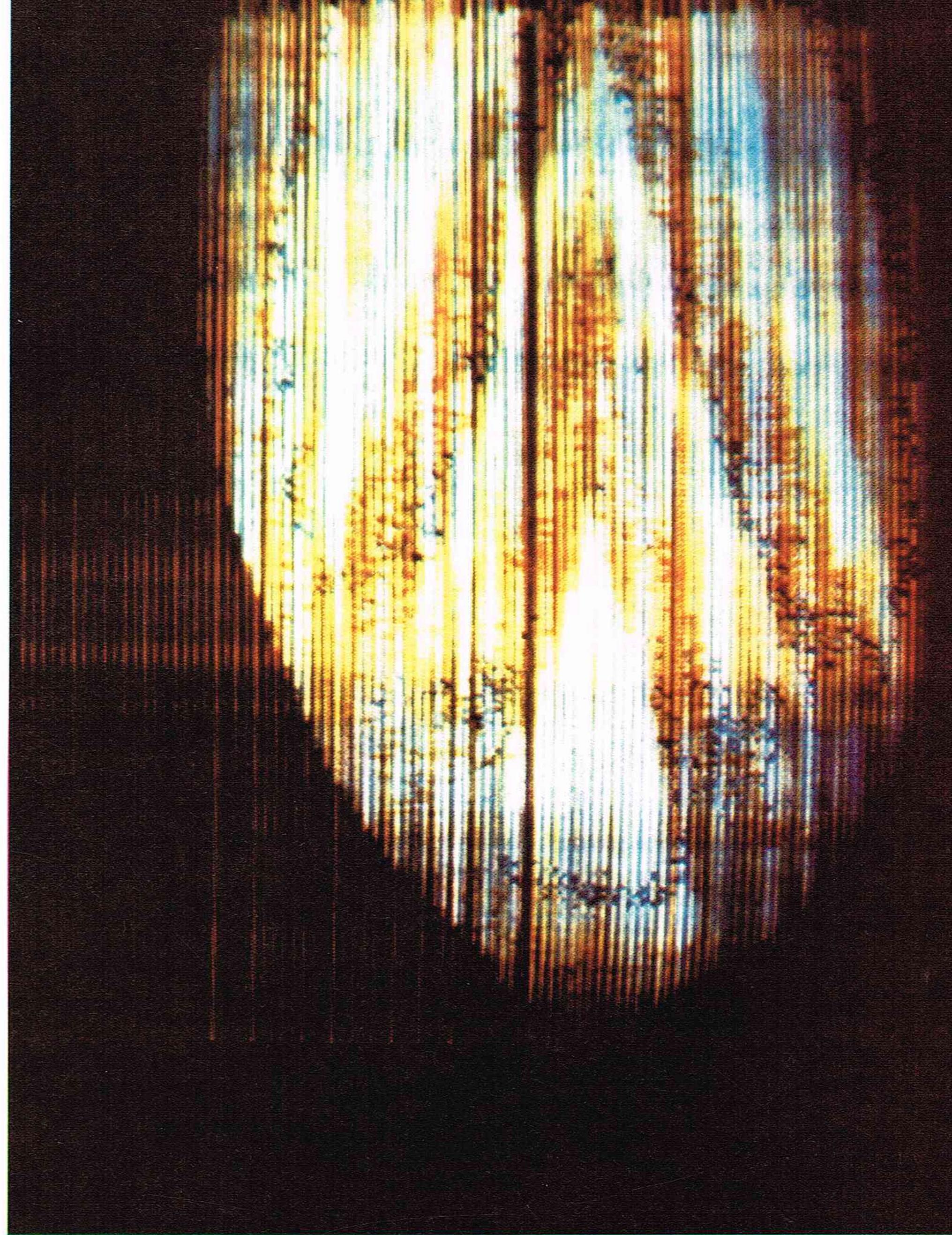
Qu'entend-on par **« résolution de problème »?** Un problème est défini par un état initial, un état final désiré et une suite d'opérations permettant d'aller de l'état initial à l'état final. Cette formulation est apparentée à celle du contrôle d'un système, avec un état initial, un état final et une trajectoire dans l'espace d'état. Quelques exemples simples permettent de voir la diversité des situations possibles. Dans le problème classique des missionnaires et des cannibales, trois missionnaires et trois cannibales doivent traverser une rivière, il n'y a qu'un seul bateau à deux places, tous peuvent ramer. Le problème est de n'avoir à aucun instant ni sur la rive de départ ni sur la rive d'arrivée plus de cannibales que de missionnaires. Il convient aussi de minimiser le nombre de traversées de la rivière. Pour formaliser ce problème, on définit un état par le nombre de missionnaires et le nombre de cannibales sur la rive de départ et la position du bateau (arrivée ou départ). L'état initial est (3, 3, Départ), l'état final est (0, 0, Arrivée). Dans la démonstration automatique de théorèmes, on se donne des prémisses et une affirmation dont le caractère exact n'est pas sûr (autrement dit, le théorème à démontrer). Il s'agit donc de développer un chemin composé d'affirmations vraies issues de règles algébriques, pour aller des prémisses à l'affirmation recherchée. Un autre exemple, simple à comprendre, mais difficile à mettre en œuvre, est fondé sur le jeu d'échecs. Comment arriver à partir d'une position des pièces, bien définie au départ, en un nombre de coups fini, à mettre « mat » le roi de l'adversaire, compte tenu des possibilités de déplacement de chacune de ses pièces et des ripostes possibles de l'adversaire ?

Dans ce domaine, les travaux ont débuté à la Rand Corporation et au Carnegie Institute of Technology (Newell, H. Simon, J. C. Shaw). Les premières recherches étaient essentiellement fondées sur la méthode appliquée par l'esprit humain pour résoudre les problèmes : établir une relation entre les entrées et les sorties d'un programme et les stimuli et réponses observés dans le domaine psychologique. Actuellement, les deux modes d'approche divergent et, tout au moins pour la résolution des problèmes, on ne cherche plus à calquer des raisonnements humains — dans la mesure où ils ont été bien compris. Ce domaine est extrêmement développé au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et au Stanford Research Institute. Par opposition à celles de la Rand Corporation, les études du MIT sont très orientées vers les représentations formelles (jeu d'échecs, etc.). L'équipe de Mc Carthy et Minsky a considéré l'intelligence artificielle comme une extension des mathématiques et plus particulièrement de la logique; elle en a donc abandonné l'aspect lié à la psychologie. J. A. Robinson développe, à partir de 1965, une nouvelle approche de la logique formelle. L'idée est de prouver qu'une affirmation est vraie si sa négation est fausse... ce qui peut apparaître comme une évidence ! Prenons un exemple simple : soit à démontrer que $A \supset B$ (A implique B) est vraie (A est l'hypothèse, B la conclusion). La méthode de Newell et Simon consisterait, à partir d'un ensemble d'axiomes $A_0$, à générer par certaines règles $A_1$, puis $A_2$... ainsi de suite jusqu'à trouver un ensemble $A_i$ qui contienne B. Une autre méthode possible consiste à montrer que la négation de $A \supset B$ est fausse. Désignons par $\overline{A}$ la négation de A.

$$\overline{A \supset B} = \overline{\overline{A} \cup B} = A \cap \overline{B}$$

Il faut donc démontrer que $(A \cap \overline{B})$ est faux, c'est-à-dire montrer que l'affirmation simultanée de A et de $\overline{B}$ est inexacte. Robinson a proposé une méthode de résolution du problème posé de cette façon-là. Pour conclure ce paragraphe, disons que l'on s'éloigne de plus en plus de la « copie » du raisonnement humain pour s'orienter vers des méthodes typiquement « machine », c'est-à-dire vers un formalisme mathématique sur la logique.

La **reconnaissance d'objet** par l'homme semble très simple, du moins pour les situations courantes. L'homme différencie facilement un véhicule d'une marque d'un autre véhicule répondant pourtant à la même fonction. C'est un problème qu'il ne se pose généralement pas. Pourtant une même voiture peut admettre des couleurs différentes, avoir des aménagements intérieurs plus ou moins recherchés... bref, pour des modèles identiques, on peut trouver des différences. Néanmoins, l'homme effectue sans peine un classement et range dans la classe du modèle X toutes les variantes élaborées par le



Tiziou - Sygma

▲ *Une image de Jupiter transmise par* **Pionneer 10** *situé à une distance de 1 100 000 km de cette planète; Jupiter étant plus gros que le champ de vision de l'appareil, celui-ci balaie la surface de la planète, entraînant ainsi une déformation en V de l'image.*

fig. 1

| (1,1) | (1,2) |
| --- | --- |
| (2,1) | (2,2) |

Richard Colin

**vecteur représentatif (0110)**

▲ *Figure 1 : un exemple de définition d'une image en noir et blanc ; le plan de l'image est divisé en quatre cellules ; la cellule à majorité noire est affectée d'un 1 ; ici, il y a quatre descriptifs, et le vecteur représentatif est (0110).*



Parimage - Colin Davey



Keystone

▶ *Comment dans le jeu d'échecs (à gauche), à partir d'une position des pièces bien définie au départ et en un nombre de coups fini, arriver à mettre « mat » le roi de l'adversaire, compte tenu des possibilités de déplacement de chacune des pièces et des ripostes possibles de l'adversaire ? Un tel problème est défini par un état initial, un état final et une suite d'opérations permettant d'aller de l'un à l'autre de ces états ; sa formulation s'apparente à celle du contrôle d'un système. On a donc essayé de faire jouer des machines (à droite) ; à l'occasion d'un congrès de cybernétique le joueur français d'origine russe Tartakover a joué et perdu contre la machine mise au point en 1922 par l'ingénieur espagnol Torres-Quevedo.*

constructeur. Pourtant tout n'a pas été appris du jour au lendemain. Qui ne s'est amusé à enseigner à son jeune enfant la notion de formes et de volumes relatifs ? Les jeux de bébé du type cubes empilables ont ce rôle, et cet apprentissage se fait, avec l'aide des parents ou parfois seul, suivant des règles internes que le père ou la mère seraient bien en peine de définir.

La reconnaissance des formes est la science qui s'occupe de définir des algorithmes permettant de classer des objets dont l'aspect a varié par rapport à un objet type. Ce que l'homme effectue naturellement, il s'agit ici de le faire faire par une machine. Ainsi, par exemple, on voudra reconnaître automatiquement l'objet « cube » au milieu d'un ensemble d'autres objets ; l'œil de la machine est une caméra, le cube à reconnaître peut avoir subi une homothétie, être un peu déformé (angles non parfaitement droits)... Malgré toutes ces modifications, l'algorithme doit pouvoir associer à cet objet inconnu le label de cube qui lui a été défini par un ensemble de propriétés. Le problème, en fait, est le suivant : pour un calculateur, comment définir qu'un changement dans la forme visualisée est négligeable et que cette dernière se rattache donc à un objet connu, ou qu'au contraire les modifications sont telles qu'il est nécessaire de définir une nouvelle classe ?

En 1958, Selfridge proposait de résoudre ce problème en calculant une certaine fonction d'éléments de base, caractères primitifs de la forme à reconnaître. On représente la forme par un vecteur à *n* dimensions, chaque composante étant la valeur prise pour la forme visualisée par un caractère défini (longueur d'une arête, angle de deux bords...). Dans un espace de dimension *n*, la forme est alors représentée par un point. Si on sait partager cet espace en régions, chacune correspondant à une forme définie, on saura effectuer la classification. Ces techniques sont en général des applications des statistiques multivariées. La première « machine » à effectuer ce travail était fondée sur le modèle d'un neurone idéal. On modélise un neurone comme un circuit à seuil basculant d'un état à l'autre lorsque la somme des excitations en entrée dépasse un certain niveau. De même, on peut imaginer un circuit ou un logiciel qui effectuent une dichotomie : si la somme pondérée des descriptifs de base de la forme est inférieure à un seuil, on « reconnaît » une forme A ; si elle est supérieure, on « reconnaît » une forme B. Cette méthode simple de reconnaissance est une méthode linéaire (travaux de Nilsson en 1965, Minsky en 1969).

En fait, les descriptifs de base dont nous avons parlé peuvent s'obtenir soit par des méthodes heuristiques, soit par des méthodes mathématiques (recherche des meilleurs éléments caractéristiques selon un certain critère). Un exemple simple de caractérisation est indiqué sur la *figure* 1. Il s'agit de définir une image noir et blanc. Le plan de l'image est divisé en cellules ; si la cellule (*i, j*) est à majorité noire, on affecte un « 1 » au descriptif correspondant. Sur notre exemple, l'image est définie par quatre descriptifs, donc par un point dans un espace à quatre dimensions. Le problème de classement devient un problème de classement de vecteurs. Signalons en dernière remarque que les algorithmes développés sont souvent indépendants des applications.

**Programmes de jeu.** Une autre application de l'intelligence artificielle, très séduisante pour l'esprit, est de faire jouer des machines. Il s'agit d'établir un programme susceptible de définir le coup suivant de manière optimale pour chaque phase de jeu. A l'heure actuelle, personne ne sait écrire un programme qui puisse atteindre les résultats humains pour des jeux complexes. Apprendre à jouer à des machines n'est pas un simple amusement (si l'on peut ainsi dire, étant donné la complexité des problèmes posés) ; cet apprentissage apporte beaucoup d'informations dans d'autres domaines de la recherche. La résolution de ces problèmes permet de définir des solutions parfois suboptimales, mais satisfaisantes pour des commandes ou des contrôles de systèmes extrêmement complexes. Une des premières applications de ce type d'étude est la définition de techniques d'apprentissage. Apprendre à quelqu'un, en effet, les règles du jeu d'échecs n'en fait pas un joueur expérimenté. Il faut jouer de nombreuses parties avec des adversaires différents pour acquérir une certaine « expérience » du jeu (on peut d'ailleurs se demander comment définir l'expérience dans un domaine). De même, pour une machine, il faut construire des logiciels auto-adaptables, qui évoluent à mesure que l'ordinateur enrichit sa connaissance. Samuel a conçu de tels logiciels répondant à la fonction « jeu d'échecs » et, bien que le jeu d'échecs soit le support de ces travaux, il n'en est nullement la finalité.

On peut aussi rattacher à l'« intelligence artificielle » la compréhension ou la reconnaissance par un calculateur du langage naturel. Là encore, il s'agit d'une application importante dont l'intérêt est évident. La particularité des ordinateurs est de nécessiter l'écriture de programmes dans un langage spécialisé avec un certain formalisme, ce qui implique la mobilisation, assez importante, du personnel adéquat. Il serait bien agréable que les machines comprennent directement des ordres écrits ou oraux énoncés dans un langage naturel. En l'état actuel des recherches, on est loin d'être arrivé à ce stade.

Un autre problème, un peu différent, mais qui concerne également la linguistique, est celui de la traduction automatique de textes d'une langue dans une autre. Au départ, on a cru qu'il relevait simplement de la capacité mémoire de l'ordinateur et qu'il suffisait d'avoir assez de place pour engranger le contenu d'un dictionnaire très complet. Aujourd'hui, cette vue optimiste n'est plus partagée, et les progrès dans ce domaine restent extrêmement faibles. Par contre, des essais sont tentés dans le domaine du tri d'information. Pouvoir réduire l'énorme flot de données circulant dans le monde, pouvoir rapidement connaître l'état d'une question à partir de l'amas de publications, congrès, réunions diverses ayant eu lieu dans ce domaine, etc., voilà qui présenterait un grand intérêt. C'est un problème d'information : il s'agit de réduire notre langage naturel, empli de redondances, à l'état d'un squelette qui définisse exactement l'information sans la réduire. Cette perspective nécessite également un important travail de recherche.

Nous terminerons cette introduction d'ensemble sur l'intelligence artificielle par quelques notions rapides sur ses **liens** possibles **avec la cybernétique.** La partie cybernétique proprement dite sera développée dans les chapitres consacrés aux systèmes, mais il est d'ores et déjà évident qu'il existe des liens entre l'intelligence artificielle et les machines automatiques susceptibles d'évoluer. Un système en mesure de s'adapter aux modifications de son environnement est un système typiquement cybernétique. Cependant, pour qu'un système soit auto-organisable, il ne lui suffit pas d'avoir des informations sur ses sorties; une simple régulation serait alors « intelligente »! La définition de l'auto-adaptabilité est délicate : elle doit inclure le fait que le système, non seulement, reçoit et exploite des informations sur l'extérieur et sur ses réponses, mais aussi doit pouvoir modifier sa structure pour répondre aux évolutions extérieures. Nous n'en sommes pas encore là.

Une application immédiatement perceptible est celle de la robotique; un véhicule automatique, évoluant en milieu hostile, sur une autre planète par exemple, doit pouvoir s'adapter et éventuellement modifier son mode de « pensée » en fonction des actions extérieures. La science-fiction a déjà vulgarisé ce type de recherche. Mais, plus simplement, essayer, par exemple, de faire saisir par un bras mécanique un objet type cube placé au milieu de formes différentes n'est pas un problème facile.

Le robot construit à Stanford University et présenté en 1968 avait pour « cerveau » un ordinateur Digital Equipment PDP 11/40, pour « oreille » un microphone classique, pour « œil » une caméra de télévision et pour « bras » un bras mécanique. A partir de cette description d'un robot déjà réalisé, on perçoit nettement les difficultés propres de la robotique : technologie de miniaturisation des mémoires informatiques, traitement de données captées (images, sons...), reconnaissance de formes, commande automatique et rapide d'organes de préhension. Certaines de ces questions rejoignent celle de l'intelligence artificielle; il est toutefois évident que nous n'allons pas traiter ici tous ces sujets. Nous focaliserons le développement sur certains points seulement.

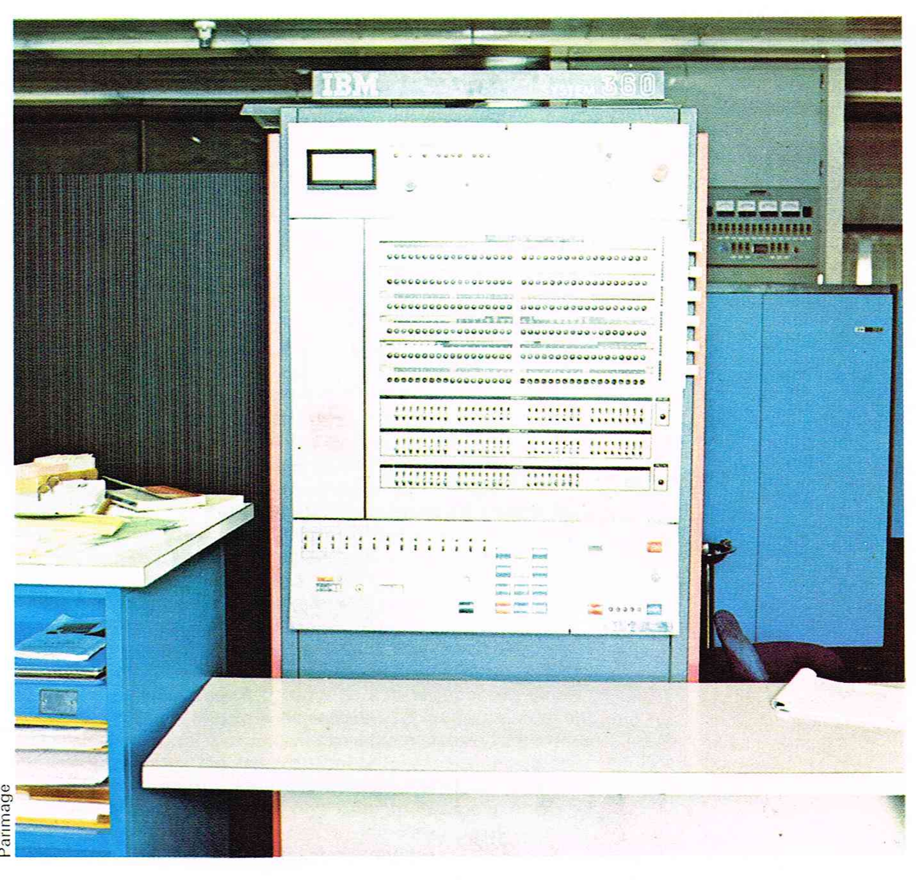
## La reconnaissance de formes

La reconnaissance de formes a été brièvement définie plus haut; nous allons maintenant décrire les méthodologies mathématiques utilisées. Un des objectifs de la reconnaissance de formes est la *classification*, qui est une des bases de l'intelligence. Cela nous paraît si aisé que nous serions bien en peine d'en formaliser les règles. Prenons un exemple simple : soit à reconnaître la lettre **H** parmi un ensemble de lettres. Une règle pourrait être : j'identifie la lettre **H** si la figure examinée comporte deux traits verticaux reliés par une ligne horizontale (*fig.* 2a). On s'aperçoit qu'avec cette description claire et évidente, la *figure* 2b ne sera pas identifiée comme la lettre **H**, alors que l'esprit humain s'est adapté et n'a pas tenu compte du fait que, dans la *figure* 2b, le trait horizontal ne touchait pas exactement l'un des deux traits verticaux.

Prenons deux autres exemples : lorsqu'un médecin effectue un diagnostic, il ne cherche pas en fait le nom de la maladie, il doit déterminer si le patient examiné se rattache à une classe de patients pour lesquels tel traitement est recommandé. Lorsqu'un radariste examine un écho radar, il doit décider si cet écho est dû à un avion, par exemple, ou bien s'il est simplement provoqué par un phénomène aléatoire (bruit par exemple). La simple détection du phénomène est insuffisante, il y a nécessité d'une prise de décision.

Ces trois exemples sont différents : le premier relève de la perception, le second du raisonnement logique, le troisième de la théorie de la détection. Cependant, la résolution du problème posé dans chacun des cas peut nécessiter des méthodologies identiques. L'observateur dispose d'un ensemble d'objets décrits par un nombre fini d'attributs (par exemple, la définition de la lettre **H**). Chaque objet se rattache au moins à une classe. On peut alors distinguer trois problèmes : celui de la classification (l'observateur range la forme observée dans une des classes selon des règles très précises); celui de l'élaboration des règles de classement précédemment utilisées à partir d'un ensemble-test dont l'appartenance à une classe est connue; enfin celui du regroupement (on établit les règles à partir d'un ensemble dont on ne connaît pas le classement).

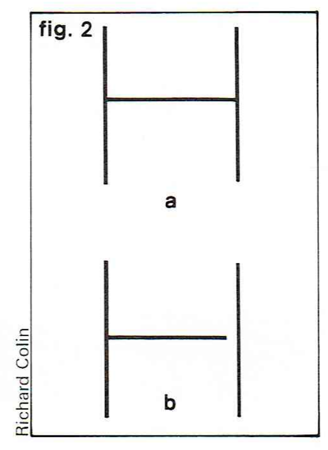
Définissons plus complètement le problème de l'**élaboration des règles de classement** à partir d'un ensemble-test de classes connues. On peut distinguer deux procédures d'utilisation de l'ensemble-test. Il est tout d'abord possible de scinder l'ensemble-test en deux sous-ensembles, d'élaborer une règle de classement avec le premier sous-ensemble, puis de tester le deuxième sous-ensemble avec la règle du premier. Cette méthode



Parimage

▲ *Le service du traitement de l'information de l'E.D.F. à Issy-les-Moulineaux (France) fonctionne à l'aide d'ordinateurs.*

▼ *Figure 2 : un exemple simple de reconnaissance de formes, celle de la lettre* H *parmi un groupe d'autres lettres; la simple définition de* H *comme l'ensemble de deux traits verticaux et un trait horizontal n'est pas suffisante; en* a*, il s'agit bien d'un* H*, mais pas en* b *car le trait horizontal ne touche pas les deux barres verticales.*



Richard Colin

▶ *Figure 3 : un exemple d'application au domaine médical de la méthode séquentielle de classement, l'établissement d'un diagnostic à partir d'une série de tests.*

permet de calculer une probabilité d'erreur de l'organe de classement ainsi élaboré. Une deuxième possibilité est de présenter les éléments de l'ensemble-test de façon séquentielle et d'adapter successivement la règle de classement jusqu'à vérifier un critère de qualité. La deuxième procédure relève typiquement de l'intelligence artificielle, puisqu'elle se développe à partir de la possibilité d'adaptation des machines (il y a évolution à mesure que l'expérience s'enrichit). En réalité, dans les expériences courantes, on ne change pas la règle de classement chaque fois que l'on décèle une erreur; sinon on imagine facilement l'anarchie qui s'ensuivrait rapidement. Il n'y a modification que lorsque la fréquence d'erreur dépasse un certain seuil. La façon dont l'organe de reconnaissance modifie ses règles de classement est surtout déterminée par la prise en compte de l'information apportée par chaque élément de l'ensemble-test. Il peut y avoir soit mémorisation de l'information issue de l'objet-test au moment où celui-ci se présente, soit calcul statistique sur les données et mise à jour de ces statistiques.

Considérons un organe de classement fonctionnant de la manière suivante : partant d'une règle de classification arbitraire, il modifie cette règle à mesure que s'enrichit son information par la présentation de nouveaux objets-tests dont la classe est connue. Si, à un moment donné, quel que soit l'objet présenté, il n'y a plus modification des règles, on dit qu'il y a eu convergence. Si donc on se donne un algorithme d'association des règles de décision à l'information présentée, il importe de se préoccuper des conditions à respecter pour assurer la convergence. Si de plus la règle vers laquelle l'algorithme converge permet de maximiser un critère de qualité donné *a priori*, l'algorithme est dit optimal. Le critère de qualité le plus fréquemment choisi est la probabilité de bon classement, que l'on cherche à avoir supérieure à une certaine valeur.

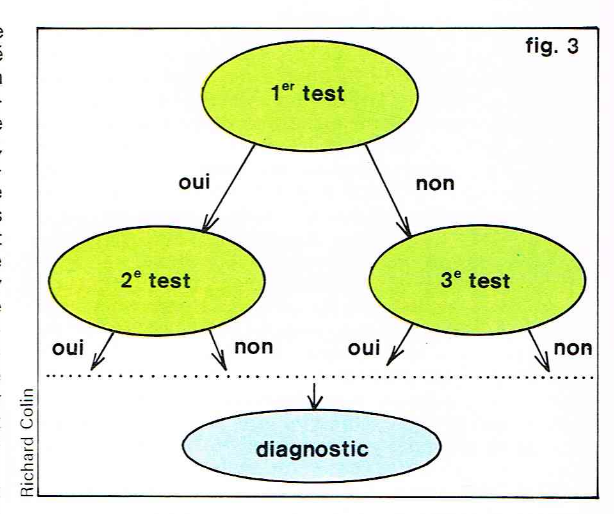
On peut distinguer deux grands ensembles de règles de classification. Il a été précisé plus haut que tout objet pouvait être défini par un vecteur de caractères. On peut alors définir des règles dont le fonctionnement est dit parallèle ou séquentiel. Dans le premier cas, on teste toutes les composantes du vecteur, et l'appartenance de l'objet à une classe est déterminée par le résultat de tous les tests. Au contraire, dans le second cas, on teste un sous-ensemble de composantes : ou bien on peut, d'après ces tests, classer l'objet, ou bien on prend un deuxième sous-ensemble de composantes auquel on applique d'autres tests.

Concrétisons la procédure de la *méthode parallèle :* soit $\mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ le vecteur descriptif de l'objet et $m$ le nombre de classes. Dans le cas de la méthode parallèle, on connaît un ensemble de fonctions

$$F = \{f_i\},\ i \text{ allant de 1 à } m \text{ avec } f_i = f_i\ (x_1, ..., x_n)$$

un objet déterminé sera classé dans la classe $k$ si $\max f_i\ (x_1, ..., x_n) = f_k\ (x_1, ..., x_n)$ pour $i$ de 1 à $m$. Le temps nécessaire au classement d'un objet est donc égal au temps de calcul des $m$ fonctions $f_i$, ce calcul pouvant être réalisé dans n'importe quel ordre.

Une description formelle de la *méthode séquentielle* est plus délicate. C'est une méthode très utilisée dans le domaine médical : on peut très bien comprendre son fonctionnement à l'aide d'un graphe (*fig.* 3). Avec le même ensemble de tests, cette méthode nécessite en moyenne moins de calculs que la méthode parallèle. On peut utiliser plusieurs types de descripteurs pour les objets. Dans la plupart des cas, ceux-ci sont définis par des mesures (par exemple, en nombre $n$). En utilisant un espace à $n$ dimensions, l'objet se trouve représenté par un point dont les $n$ coordonnées sont les valeurs des $n$ mesures. Une classe pourra alors être représentée par une zone de cet espace, repérée par un objet type appartenant à cette classe. La méthode de classement pourra être fondée sur une notion de distance : on placera l'objet observé dans la classe la plus « proche ». Cependant, cette notion de distance n'est pas toujours précise. Ainsi, par exemple, dans le cas où les « mesures » sont des identificateurs du type sexe, race..., la description est constituée d'une liste de caractères et non de mesures, la représentation par un vecteur restant toutefois possible.



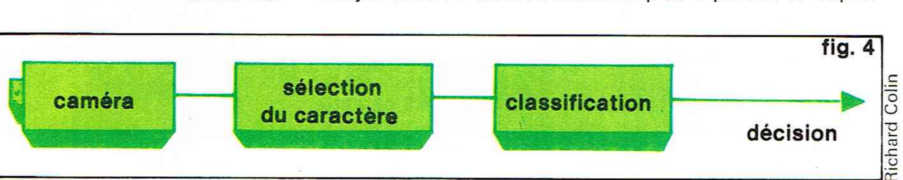

Il est également possible de réaliser une *description structurelle* des objets : l'objet est défini non par des mesures absolues comme précédemment, mais par des relations entre les composantes du vecteur. Ce type de description est particulièrement utilisé dans le domaine de la linguistique. On conçoit très bien que la description d'une phrase par son nombre de mots, de verbes ou de compléments ne présente que peu d'intérêt. Il faut préciser les liens structurels existant entre les différents composants comme pour une analyse grammaticale. Ce n'est pas la seule application de cette description; on l'a également utilisée pour des images, dans l'informatique graphique, etc.

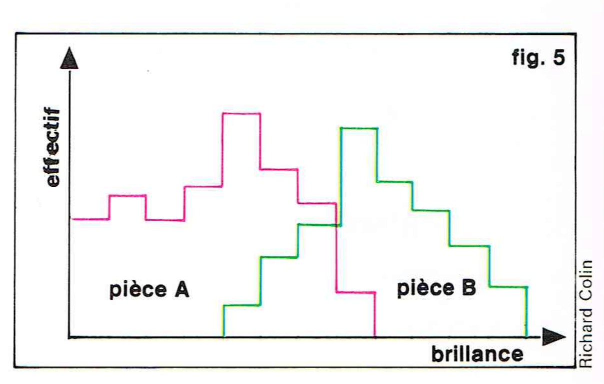
## Les méthodes de reconnaissance et de classification dans un espace euclidien

Pour illustrer le type de problèmes auxquels nous nous intéressons, étudions l'exemple suivant, purement imaginaire. Supposons que l'on désire trier deux pièces métalliques polies de manière automatique. Le système utilisé est représenté par la *figure* 4. Une caméra prend une image de la pièce, un appareil choisit certains caractères représentatifs de l'image, un organe permet la décision après classification. Le problème réside dans l'élaboration des organes permettant d'extraire les informations contenues dans les images et d'en faire la classification. Exploitant le fait que les deux pièces « brillent » de façon différente, on va utiliser la brillance comme premier caractère. On espère que, par exemple, l'une des pièces réfléchira la lumière plus intensément que l'autre et que l'on pourra effectuer la séparation à l'aide d'un seuil. On réalise donc des mesures de brillance sur un échantillon type; les histogrammes obtenus ne permettent visiblement pas une séparation évidente (*fig.* 5). L'étude de la brillance ne suffit donc pas.

Un examen plus attentif permet de constater que les deux pièces ont un grain différent. Ce caractère est plus

▼▶ *Figure 4 : processus utilisé pour trier automatiquement deux pièces métalliques polies; une caméra prend une image des pièces, un appareil choisit certains caractères représentatifs de l'image, et un organe permet la décision après classification.*
*Figure 5 : histogramme de la brillance d'échantillons types de pièces métalliques triées par une machine automatique; la séparation des pièces n'est pas évidente.*



délicat à mesurer, mais peut-être se déduit-il des passages du blanc au noir sur l'image. On va donc exploiter simultanément ces deux caractères : $x_1$ = brillance ; $x_2$ = grosseur du grain. Pour un échantillon choisi au hasard, on représente les diverses valeurs obtenues par un point dans le plan ($x_1x_2$). On constate que les points se rassemblent en deux nuages à peu près distincts que l'on peut séparer par une droite (les deux groupes sont dits linéairement séparables). Une fois connue l'équation de cette droite, l'organe de classification est élaboré, et il ne reste plus qu'à tester l'appareil construit et à estimer sa probabilité d'erreur en effectuant le classement de nouveaux échantillons dont on sait s'ils sont du type A ou B. Cet exemple simple permet de comprendre les problèmes que cherchent à résoudre les méthodes de reconnaissance de formes.

Nous supposerons dans toute la suite de ce paragraphe que les objets sont représentés par un *vecteur* dont chaque composante correspond à une mesure. Un objet est donc figuré par un point dans un espace dont la dimension est égale au nombre de composantes du vecteur représentatif. Soit $m$ le nombre de classes $C_1$, ..., $C_m$ mutuellement exclusives, soit **x** le vecteur de l'objet dans l'espace à $n$ dimensions. A chaque classe $C_i$ correspond une région $R_i$ de l'espace ; si l'objet à identifier a son point représentatif dans la région $R_i$, on l'affecte à la classe $C_i$. On pourra caractériser la règle de classification ainsi définie par le nombre d'erreurs commises, c'est-à-dire le nombre d'objets mal classés. Ce que nous allons développer repose sur la notion de *distance* : suivant la valeur que va prendre la fonction distance de deux objets, ceux-ci pourront être déclarés proches ou éloignés, donc placés dans la même classe ou dans deux classes différentes. Prenons comme distance la distance euclidienne classique entre **x** et **y**, $d$ (**x**, **y**) :

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left(\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2\right)^{1/2} \qquad (fig.\ 6)$$

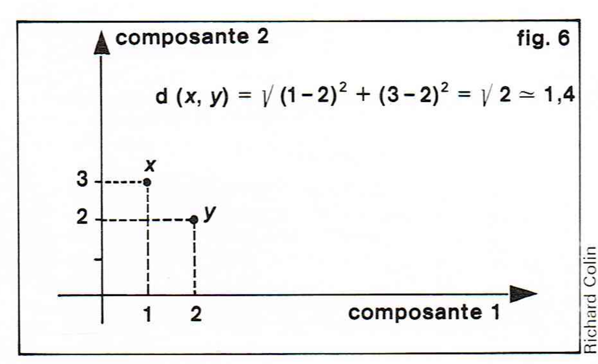
$x_i$ et $y_i$ sont les composantes de **x** et de **y**.

Deux points **x** et **y** sont à la même distance que les points **x'** et **y'** si $x_i - y_i = x'_i - y'_i$ pour toutes les valeurs de $i$ ; c'est une condition suffisante mais non nécessaire. Dans ce cas particulier, il suffit donc de comparer les coordonnées sur chaque axe. Cette comparaison n'est pas toujours possible, par exemple dans le cas où les descriptifs de la forme représentent une qualité et non une mesure quantitative. Ainsi, si un axe indique le caractère plus ou moins sombre d'un objet avec une échelle cardinale (un objet noir est plus sombre qu'un objet jaune), la comparaison de $x_i$ et de $y_i$ n'a aucun sens. C'est ce cas que nous avons écarté au départ. Au contraire, lorsqu'un axe indique par exemple une longueur, la différence entre $x_i + h$ et $x_i$ est indépendante de la valeur de $x_i$ ; faire cette comparaison a donc un sens. En plus de la propriété précédente, on demandera aux échelles d'être invariantes dans une transformation linéaire, ce qui simplifiera les traitements.

La technique de classification est fondée sur le *théorème de Bayes* que nous allons rappeler. Fixons-nous des hypothèses mutuellement exhaustives $H_1$ ... $H_n$ :

$$P(H_i \cdot H_j) = 0 \qquad \text{pour } i \neq j$$

$$\sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1$$




◀ *Figure 6 : notion de distance entre deux objets* x *et* y *: dans ce cas précis elle est de :*
$d(x, y) = \sqrt{(1-2)^2 + (3-2)^2} = \sqrt{2} \simeq 1,4$.

On ne peut savoir directement à partir des mesures quelle hypothèse est vraie. L'ensemble des observations est constitué de $E_1$ ... $E_m$. On connaît la probabilité pour que l'événement $E_i$ se produise si l'hypothèse $H_j$ est vraie : cette probabilité ($P(E_i \mid H_j)$) est une probabilité conditionnelle. Les résultats $E_i$ sont considérés comme mutuellement exhaustifs.

$$\left.\begin{array}{l} P(E_i \cdot E_j \mid H_k) = 0 \\ \sum_{i=1}^{n} P(E_i \mid H_k) = 1 \end{array}\right\} \quad \forall k = 1, n$$

Par l'axiome des probabilités totales :

$$P(E_i) = \sum_{i=1}^{n} P(E_i \mid H_j) \times P(H_j)$$

Pour concrétiser ces notions, prenons un exemple simple. Soit deux hypothèses :

$H_1$ : l'étudiant réussit un examen ;
$H_2$ : l'étudiant échoue.

Les probabilités respectives de ces deux hypothèses sont 0,7 et 0,3 ; on observe trois événements $E_1$, $E_2$, $E_3$.

$E_1$ : l'étudiant a suivi tous les cours ;
$E_2$ : l'étudiant n'a suivi aucun cours ;
$E_3$ : l'étudiant a suivi 50 % des cours.

On se donne le tableau des probabilités conditionnelles :
$P(E_1 \mid H_1)$ = rapport du nombre d'étudiants ayant suivi tous les cours et réussi à l'examen au nombre d'étudiants ayant réussi à l'examen : 0,4.

$P(E_2 \mid H_2)$ = rapport du nombre d'étudiants n'ayant suivi aucun cours et ayant échoué au nombre d'étudiants ayant échoué : 0,75.

On définit de même les autres probabilités conditionnelles :

$$P(E_2 \mid H_1) = 0{,}2 \qquad P(E_3 \mid H_1) = 0{,}4$$
$$P(E_1 \mid H_2) = 0{,}05 \qquad P(E_3 \mid H_2) = 0{,}2.$$

On se pose alors le problème suivant : on a constaté que l'étudiant au cours de l'année n'a assisté à aucun cours ; quelle est la probabilité qu'il réussisse à l'examen ? Il faut donc évaluer $P(H_1 \mid E_2)$. D'après les définitions des probabilités :

$$P(E_2 \cdot H_1) = P(H_1 \mid E_2) \times P(E_2) = P(E_2 \mid H_1) \times P(H_1)$$

$$P(H_1 \mid E_2) = \frac{P(E_2 \mid H_1) \times P(H_1)}{P(E_2)}$$

D'après l'axiome des probabilités totales :
$P(E_2) = P(E_2 \mid H_1) \times P(H_1) + P(E_2 \mid H_2) \times P(H_2)$
Donc :

$$P(H_1 \mid E_2) = \frac{P(E_2 \mid H_1) \times P(H_1)}{P(E_2 \mid H_1) \times P(H_1) + P(E_2 \mid H_2) \times P(H_2)}$$

Pour notre exemple, on obtient :

$$P(H_1 \mid E_2) = \frac{0{,}2 \times 0{,}7}{0{,}2 \times 0{,}7 + 0{,}75 \times 0{,}3} = 0{,}38$$

L'exemple précédent est une application du théorème de Bayes :

$$P(H_i \mid E_j) = \frac{P(E_j \mid H_i) \times P(H_i)}{\sum_{k=1}^{n} P(E_j \mid H_k) \times P(H_k)}$$

Revenons au problème de reconnaissance de formes ; soit **x** l'objet à classer dans une des $m$ classes. **x** sera placé dans la classe $C_k$ si

$$P(C_k \mid \mathbf{x}) > P(C_i \mid \mathbf{x}) \qquad \forall i \neq k.$$

On sépare l'espace à $n$ dimensions en $m$ régions $R_1$ ... $R_m$ ; dans $R_k$ la relation précédente est vérifiée. Appliquons le théorème de Bayes

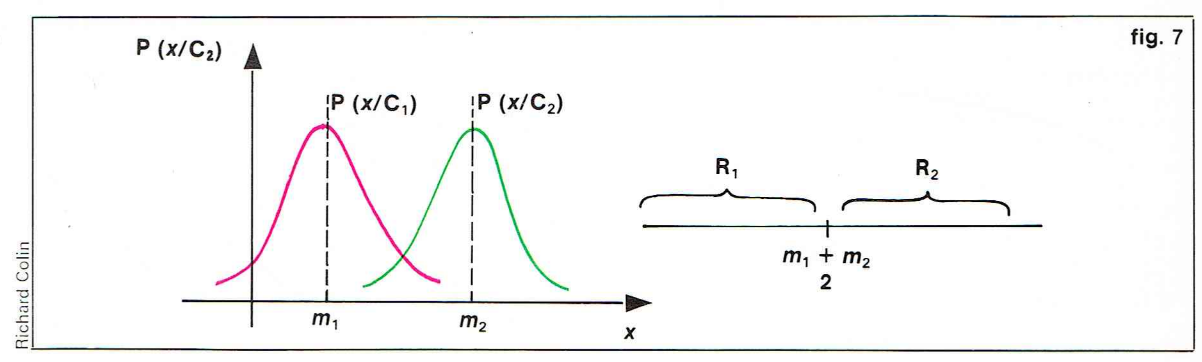
$$P(C_k \mid \mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x} \mid C_k) \times P(C_k)}{\sum_{i=1}^{n} P(\mathbf{x} \mid C_i) \times P(C_i)}$$

L'inégalité précédente s'écrit donc :

$$P(\mathbf{x} \mid C_k) \times P(C_k) > P(\mathbf{x} \mid C_i) \times P(C_i) \qquad \forall i \neq k.$$

Prenons un exemple avec deux classes $C_1$ et $C_2$, supposons l'objet représenté uniquement par un caractère, donc monodimensionnel. Si l'objet appartient à la classe $C_1$,

▶ *Figure 7 : qu'il appartienne à la classe $C_1$ ou à la classe $C_2$, l'objet x à classer suit une loi de Gauss de moyenne $m_1$ ou $m_2$.*




**x** suit une loi de Gauss de moyenne $m_1$ et de variance $\sigma^2$, s'il appartient à la classe $C_2$, **x** suit une loi de Gauss de moyenne $m_2$ et de variance $\sigma^2$ avec $m_2 > m_1$, donc :

$$P(\mathbf{x} \mid C_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-m_1)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$P(\mathbf{x} \mid C_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-m_2)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Supposons les deux classes équiprobables :

$$P(C_1) = P(C_2) = 0{,}5\,;$$

l'application de la règle précédente conduit à classer **x** en $C_1$ si :

$$P(\mathbf{x} \mid C_1) \times P(C_1) > P(\mathbf{x} \mid C_2) \times P(C_2)$$

soit :

$$\exp\left[-\frac{(x-m_1)^2}{2\sigma^2}\right] > \exp\left[-\frac{(x-m_2)^2}{2\sigma^2}\right]$$

soit encore :

$$-(x-m_1)^2 > -(x-m_2)^2\,;$$

toutes simplifications effectuées, on obtient la règle suivante : **x** est classé en $C_1$ si $x < \dfrac{m_1 + m_2}{2}$.

▶ *Figure 8 : définition de la distance d'un point x à un ensemble de points y.*

Nous avons représenté les deux lois (*fig.* 7), ainsi que les deux régions $R_1$ et $R_2$ dans l'espace des observations, qui est ici une droite. La réponse semble logique : l'objet est classé dans $C_1$ si $x$ est plus petit que la demi-somme des moyennes. Il est à remarquer que les lois de Gauss sur lesquelles nous avons raisonné ont des variances, donc des dispersions identiques, et que les classes sont équiprobables. Si cette dernière propriété, par exemple, n'était pas satisfaite, il y aurait destruction de l'aspect symétrique du problème.

La règle définie ci-dessus ne tient pas compte d'une donnée importante : le coût particulier d'une mauvaise classification. Par exemple, il peut être très grave pour un patient que le médecin ne diagnostique pas un état alarmant — d'autres erreurs de classification peuvent avoir des conséquences moins graves. Pour tenir compte de ces coûts, il suffit de modifier légèrement la règle de Bayes énoncée. Introduisons des fonctions de pondération $f(C_i/C_j)$ = coût du classement de **x** dans la classe $C_i$ alors qu'il appartient à la classe $C_j$. Si **x** est classé dans $C_i$, le coût moyen de mauvais classement vaut :

$$\bar{f}(\mathbf{x} \in R_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m} P(\mathbf{x} \mid C_j)\, P(C_j)\, f(C_i \mid C_j)\,;$$

on partage donc l'espace des observations en régions $R_1 \ldots R_m$ de façon à minimiser $\bar{f}$.

La méthode de Bayes suppose connues les probabilités *a priori* des classes et les probabilités conditionnelles $P(\mathbf{x} \mid C_i)$. Ces informations ne sont pas toujours disponibles dans certains problèmes de reconnaissance de formes. On peut alors chercher à estimer les probabilités *a priori* $P(C_i)$, à l'aide d'un échantillon type, par le rapport du nombre d'éléments de la classe $C_i$ à la taille de l'échantillon. Encore faut-il que l'échantillon soit doublement représentatif, d'une part, de chaque classe, d'autre part, de leur fréquence d'apparition. On peut également, pour les probabilités conditionnelles $P(\mathbf{x} \mid C_i)$, faire l'hypothèse d'une loi de Gauss généralement multidimensionnelle et estimer à partir de l'échantillon type les paramètres de cette loi. C'est l'approche dite statistique.

▶ *Figure 9 : un exemple de calcul de la distance inter-ensembles (distance entre les ensembles X et Y).*

Quand les hypothèses afférentes à cette approche ne sont pas valides, on a recours à des méthodes non paramétriques qui consistent à **classer les objets suivant leur proximité.** La distance d'un point **x** à un point **y** a été définie par :

$$d^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2.$$

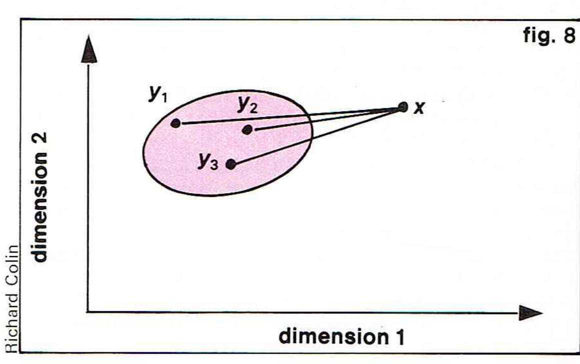
Un point **x** est dit « proche » d'un ensemble Y de $n_y$ points si :

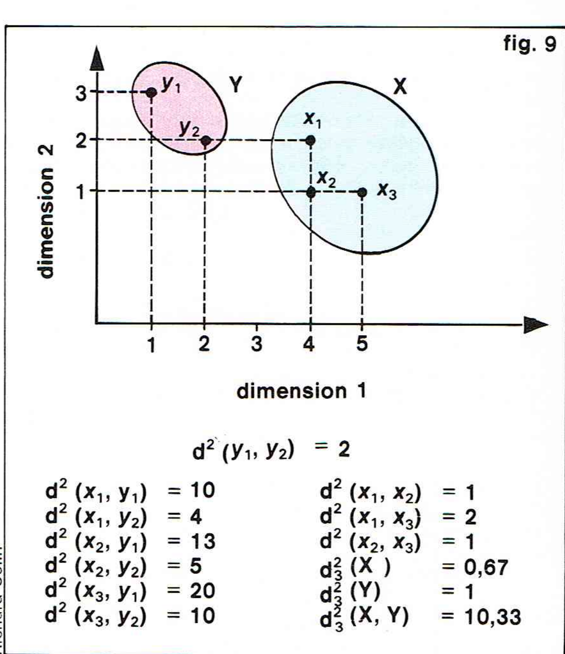
$$d_1^2(\mathbf{x}, Y) = \frac{1}{n_y} \sum_{i=1}^{n_y} d^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \qquad \text{pour } y_i \in Y$$

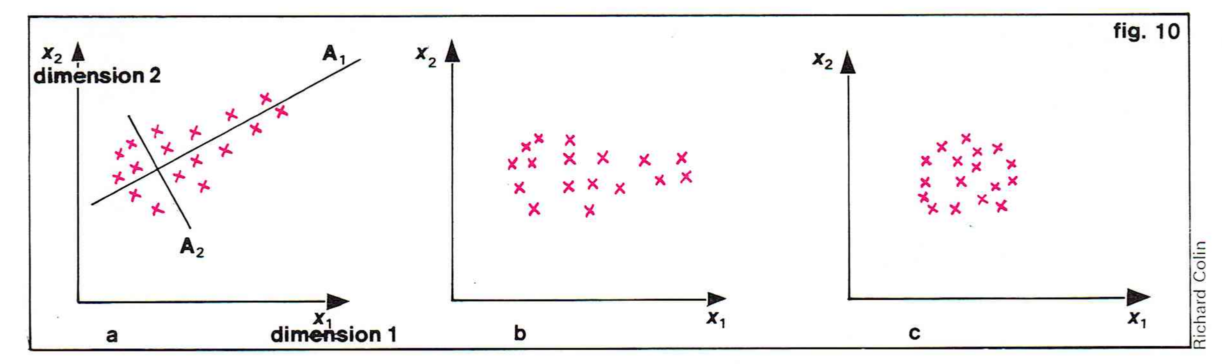
est faible. $d_1(\mathbf{x}, Y)$ représente la moyenne des carrés des distances de **x** aux points $\mathbf{y}_i$ de Y (*fig.* 8).

Pour comparer deux ensembles X et Y, composés respectivement de $n_x$ et $n_y$ points, on définit la distance moyenne inter-ensembles par

$$d_2^2(X, Y) = \frac{1}{n_x n_y} \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} d^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j)$$






◀ *Figure 10 : transformation linéaire avec conservation des surfaces dans le cas particulier d'un espace à deux dimensions ; a, le groupe de points est considéré comme une ellipse ; b, rotation des axes de coordonnées de façon à les rendre parallèles aux axes de l'ellipse ; c, transformation de l'ellipse en cercle par changement des échelles de chaque axe.*

La *figure* 9 donne un exemple de calcul de cette distance inter-ensembles. On peut enfin caractériser la notion de rassemblement de points pour un ensemble X par :

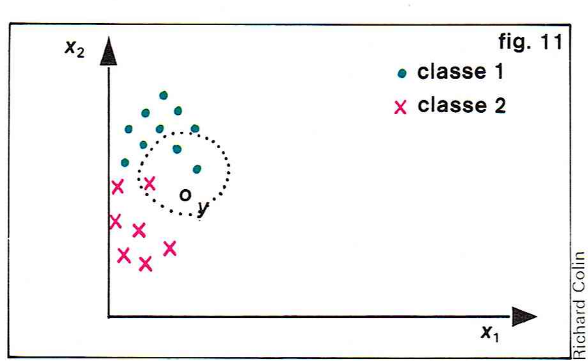
$$d_3^2\,(\mathrm{X}) = \frac{1}{n_x\,(n_x - 1)} \sum_{i=1}^{n_x-1} \sum_{j=1}^{n_y} d^2\,(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$$

$d_3^2$ (X) est la moyenne des carrés des distances des points d'un ensemble, cette grandeur est faible si les points sont proches les uns des autres.

Pour améliorer le traitement, une idée simple est d'effectuer une transformation de l'espace des observations dans un autre espace, dans lequel les groupes correspondant à des classes différentes seraient très séparés et les points dans chaque groupe très liés. La transformation généralement cherchée est linéaire en raison des propriétés de ces transformations. Une première idée est de trouver une transformation linéaire qui minimise $d_3^2$ (X), autrement dit qui regroupe bien les données de chaque classe. Sans aucun développement mathématique, nous allons décrire les différentes phases de la méthode. Pour éviter une transformation triviale, on impose à la transformation de conserver les volumes d'un espace à l'autre. En fait, il suffit de trouver une transformation qui regroupe les points images dans un volume sphérique ; en effet, $d_3$ (X) est minimal lorsque X est une sphère. Cette transformation est représentée sur la *figure* 10, dans le cas d'un espace à deux dimensions. Au départ, le groupe de points est considéré comme formant un ellipsoïde, une ellipse dans le cas à deux dimensions *figure* 10a. On détermine les axes de cette ellipse. On effectue une rotation des axes de coordonnées de manière à les rendre parallèles aux axes de l'ellipsoïde (*fig.* 10b). Le volume n'est évidemment pas modifié par cette rotation. En changeant les échelles de chaque axe, on déforme l'ellipsoïde jusqu'à le transformer en une hypersphère (un cercle dans l'espace à deux dimensions, *fig.* 10c). Il faut simplement faire attention à ce que toute augmentation d'échelle sur un axe soit compensée par une diminution d'échelle sur un autre axe afin de préserver le volume.

On peut présenter deux objections à l'utilisation de $d_3$ (X) : la première est qu'il faut opérer une transformation différente pour chaque classe, ce qui complique le processus de classification ; la seconde est qu'à prendre séparément chaque classe on ne peut pas tenir compte des éventuels contrastes au sein de l'espace de départ des observations. Aussi préfère-t-on souvent un autre critère : majorer la séparation de points se trouvant dans des classes différentes en maintenant constantes les sommes des distances entre points de chaque classe. Cette méthode est appelée *analyse discriminante*. En raisonnant intuitivement, on doit aboutir à un nouvel ensemble de mesures où les éléments d'une même classe ont des valeurs semblables, les éléments de classes différentes des valeurs dissemblables. Nous ne détaillerons cette analyse parfois complexe qu'à travers un exemple dans le paragraphe consacré au diagnostic médical.

La première méthode de classification exposée supposait la connaissance des différentes lois de probabilités (règle de Bayes) ; la seconde méthode ne nécessite pas cette connaissance, elle est fondée sur des minorations ou majorations de distances moyennes. Nous allons exposer une troisième méthode qui ne fait appel à aucune de ces quantités, la **règle** dite **du « *k*-ième voisin le plus proche ».** Cette méthode est particulièrement

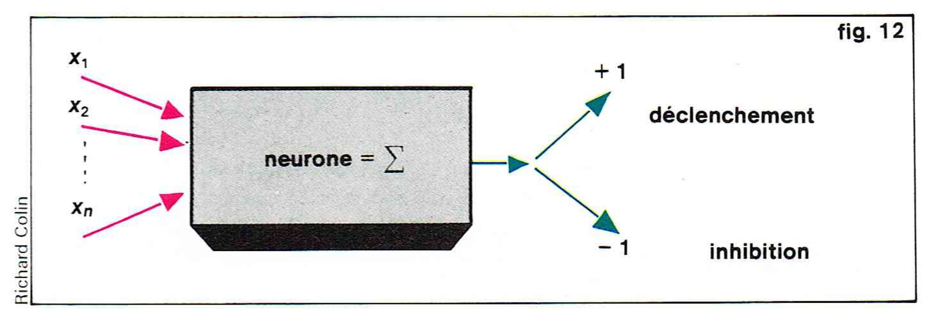



◀ *Figure 11 : méthode de classification par la règle du k-ième voisin le plus proche dans le cas d'un espace à deux dimensions et de k = 3 voisins proches ; dans ce cas, y est affecté à la classe 1, car sur trois voisins, deux appartiennent à cette classe.*

simple. Supposons que, dans l'espace à $n$ dimensions, nous disposions d'un ensemble de formes $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2$, ..., $\mathbf{x}_n$ dont la classe est connue. Soit **y** l'élément à classer (pour simplifier le raisonnement, nous nous placerons dans le cas d'une dichotomie, où sont données deux classes). En se fixant une distance, on examine quels sont les $k$ « voisins » les plus proches : si, parmi ces $k$ « voisins », il y en a plus de la classe 1 que de la classe 2, **y** est affecté à la classe 2, et réciproquement. $k$ est fixé par l'utilisateur : plus il est grand, plus l'algorithme est lent. La *figure* 11 donne un exemple avec $n = 2$ et $k = 3$ ; l'élément **y** est affecté à la classe 1, car sur trois « voisins » deux éléments appartiennent à cette classe. Cette règle présente une propriété très intéressante. Soit $p$ la probabilité d'erreur caractéristique de cette règle, et $p_{opt}$ la probabilité d'erreur pour le théorème de Bayes. Si la taille l'échantillon est infinie, la probabilité $p$ est majorée par $2\,p_{opt}\,(1 - p_{opt})$. Cette propriété est performante pour une règle simple.

Enfin, nous allons donner un exemple de **méthode adaptative** de classification : **le perceptron.** Cette machine est très connue depuis le premier article de Rosenblatt paru en 1958. Nous la présentons pour deux classes. Le principe de départ est fondé sur le modèle du neurone élaboré par Mc Culloch et Pitts en 1943. Le neurone est approché par un modèle cellulaire, un noyau dans un corps et un axe le long duquel se propagent des impulsions électriques, du corps vers les autres neurones. Arrivant à un neurone, une impulsion peut déclencher ou inhiber une impulsion le long de son axe, suivant que la dose d'excitation reçue pendant un temps $\Delta t$ dépasse ou non un seuil fixé (*fig.* 12). Soit $x_1$ ... $x_n$ les excitations reçues par un neurone ; $\sum_{i=1}^{n} x_i$ est supérieur au seuil,

▼ *Figure 12 : modèle de propagation électrique le long d'un neurone ; ce modèle, qui ne tient pas compte des considérations chimiques ou neurophysiologiques, a servi de base à un algorithme adaptatif.*



il y a déclenchement d'une impulsion. Ce modèle, qui ne tient pas compte de considérations chimiques ou neurophysiologiques, a servi de base à l'algorithme adaptatif que nous allons présenter.

On dispose d'un ensemble de formes **x** de la classe $C_1$ et d'un deuxième ensemble de la classe $C_2$ ; on recherche $N+1$ valeurs $w_1 \dots w_N, w_{N+1}$ telles que *si* $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{Bmatrix}$ est un élément de $C_1$, $\sum_{i=1}^{N} w_i x_i + w_{N+1} > 0$ et si **x** est un élément de $C_2$, $\sum_{i=1}^{N} w_i x_i + w_{N+1} < 0$. On désire obtenir les valeurs $w_i$, appelées poids, de manière itérative. Afin d'unifier l'écriture, ajoutons une $(N+1)$-ième composante à chaque vecteur $\mathbf{x}_i$ et prenons-la égale à 1. En ce cas, la condition vue plus haut s'écrit :

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i x_i > 0 \qquad \text{si } \mathbf{x} \in C_1$$

Dans ce qui suit, **x** $(k)$ représente le vecteur **x** utilisé au $k$-ième pas de l'algorithme, $w_i(k)$ la valeur de $w_i$ lors de ce pas. L'algorithme fonctionne comme suit :

— si à la $k$-ième étape $x(k)$ est un élément de $C_1$ et si $\sum_{i=1}^{N+1} w_i(k)\, x_i(k) > 0$, on ne change pas les poids $w_i$ puisque **x** $(k)$ est bien classé ; mais si

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i(k)\, x_i(k) < 0,$$

alors il faut modifier les poids $w_i$, ce que l'on fait suivant la règle $w_i(k+1) = w_i(k) + cx_i(k)$ pour $i = 1$ à $N+1$ $(c > 0)$ ;

— si à la $k$-ième étape **x** $(k)$ est un élément de $C_2$ et si $\sum_{i=1}^{N+1} w_i(k)\, x_i(k) < 0$, on ne modifie pas les poids $w_i$, car $x(k)$ est bien classé ; mais si

$$\sum_{i=1}^{N+1} w_i(k)\, x_i(k) > 0,$$

il faut modifier les poids $w_i$ suivant la règle

$$w_i(k+1) = w_i(k) - cx_i(k) \qquad c > 0$$

C'est une constante fixée par l'utilisateur. On peut unifier l'exposé et n'avoir qu'une règle de modification des $w_i$ en convenant de multiplier par $(-1)$ les vecteurs **x** de $C_2$. Dans ces conditions, on doit toujours avoir $\Sigma\, w_i x_i > 0$ que $\mathbf{x} \in C_1$ ou $\mathbf{x} \in C_2$. On peut démontrer que l'algorithme converge en un nombre fini de pas si l'ensemble des formes est linéairement séparable.

Prenons un exemple pour mieux comprendre le raisonnement du perceptron. Soit deux classes $C_1$ et $C_2$ et quatre formes dans un espace à deux dimensions.

$$C_1 \begin{cases} \mathbf{x}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \mathbf{x}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{cases} \text{ que l'on transforme en } \mathbf{x}_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$C_2 \begin{cases} \mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \end{cases} \text{ que l'on transforme en}$$

$$\mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \text{puis en} \quad \mathbf{x}_3 = \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{x}_4 = \begin{Bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{Bmatrix}$$

On prend comme valeurs initiales des poids

$$w_1 = w_2 = w_3 = 0 \quad \text{et} \quad c = 1.$$

1$^{er}$ pas : on calcule $\sum_{i=1}^{3} w_i(1)\, x_i(1) = 0$ ; on modifie les poids $w_i(2) = w_i(1) + x_i(1)$

soit $w_1(2) = 0 + 0 = 0$
$w_2(2) = 0 + 0 = 0$
$w_3(2) = 0 + 1 = 1$

2$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(2)\, x_i(2) = 1 > 0$ ; les poids ne sont pas modifiés :

$w_1(3) = w_1(2) = 0$
$w_2(3) = w_2(2) = 0$
$w_3(3) = w_3(2) = 1$

3$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(3)\, x_i(3) = -1 < 0$

donc $w_1(4) = 0 - 1 = -1$
$w_2(4) = 0 + 0 = 0$
$w_3(4) = 1 - 1 = 0$

4$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(4)\, x_i(4) = 1 > 0$

$w_1(5) = w_1(4) = -1$
$w_2(5) = w_2(4) = 0$
$w_3(5) = w_3(4) = 0$

Puisqu'on ne possède plus d'échantillon, on réitère le processus avec $\mathbf{x}_1$, puis $\mathbf{x}_2$, etc., jusqu'à obtenir une solution stable ($\Sigma\, w_i x_i > 0$ quel que soit **x**).

5$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(5)\, x_i(5) = 0$

$w_1(6) = -1 + 0 = -1$
$w_2(6) = 0 + 0 = 0$
$w_3(6) = 0 + 1 = 1$

6$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(6)\, x_i(6) = 1 > 0$

$w_1(7) = w_1(6) = -1$
$w_2(7) = w_2(6) = 0$
$w_3(7) = w_3(6) = 1$

7$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(7)\, x_i(7) = 0$

$w_1(8) = -1 - 1 = -2$
$w_2(8) = 0 + 0 = 0$
$w_3(8) = 1 - 1 = 0$

8$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(8)\, x_i(8) = 2$

$w_1(9) = w_1(8) = -2$
$w_2(9) = w_2(8) = 0$
$w_3(9) = w_3(8) = 0$

9$^e$ pas : $\sum_{i=1}^{3} w_i(9)\, x_i(9) = 0$

$w_1(10) = -2 + 0 = -2$
$w_2(10) = 0 + 0 = 0$
$w_3(10) = 0 + 1 = 1$

10$^e$ pas : $\Sigma\, w_i(10)\, x_i(10) = 1 > 0$
$w_i(11) = w_i(10)$

11$^e$ pas : $\Sigma\, w_i(11)\, x_i(11) = 1 > 0$
$w_i(12) = w_i(11)$

12$^e$ pas : $\Sigma\, w_i(12)\, x_i(12) = 1 > 0$
$w_i(13) = w_i(12)$

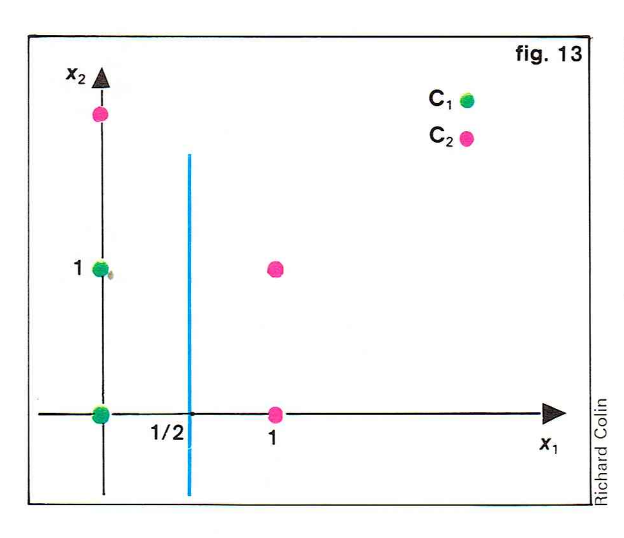
13$^e$ pas : $\Sigma\, w_i(13)\, x_i(13) = 1 > 0$
$w_i$ est stable

On constate donc, après avoir passé plusieurs fois l'échantillon dans l'algorithme, que les poids $w_i$ ne sont plus modifiés passé une certaine étape ; la séparation optimale déterminée d'après l'échantillon est :

$$w_1 = -2, \quad w_2 = 0, \quad w_3 = 1.$$

La séparatrice est donc la droite d'équation $-2x_1 + 1 = 0$. En restituant les vecteurs d'origine, un nouvel élément **x** sera classé dans $C_1$ si $-2x_1 + 1 > 0$, dans $C_2$ si $-2x_1 + 1 < 0$. La *figure* 13 montre la séparatrice obtenue.

Cet algorithme exposé sur un cas trivial possède plusieurs généralisations, en particulier si le nombre de




◀ *Figure 13 : la séparatrice calculée est — $2x_1 + 1 = 0$ (voir développement dans le texte).*

classes est supérieur à deux. Rappelons sa principale limite : il faut que les classes soient linéairement séparables, mais cet algorithme n'en permet pas la vérification.

Nous ne nous sommes préoccupés jusqu'à présent que du problème de la classification, c'est-à-dire de trouver une règle qui permette de décider à quelle classe appartient un nouvel objet. Nous avons vu successivement des règles de classification statistiques (théorème de Bayes), puis de critères de proximité (minimisation de fonctions distance, *k*-ième voisin le plus proche), et enfin le perceptron où la discrimination linéaire est déterminée de façon adaptative à partir d'un échantillon de classification connue. Dans ce dernier cas, en particulier, on doit disposer d'échantillons en nombre suffisant de chacune des classes. Ou bien les classes sont évidentes de par des raisons physiques (propriétés particulières des mesures par exemple), ou bien elles ne sont pas apparentes, et on doit alors déterminer quelles classes peuvent être réalisées à partir des mesures : c'est le but du **regroupement (« clustering »).** Le problème est de déterminer quelles formes sont suffisamment semblables pour les regrouper au sein d'une même classe. Ce problème intéresse un grand nombre de disciplines scientifiques. En psychiatrie par exemple, le classement des différentes détériorations de la personnalité en troubles psychiques dépressifs, en schizophrénie, etc., n'est pas toujours évident. Mais c'est peut-être en biologie que les techniques de regroupement ont eu le plus d'applications. Il est admis en effet que le groupement des espèces en familles et genres traduit une commune évolution. Auparavant, cette évolution avait été repérée selon un certain nombre de caractères arbitrairement choisis ; actuellement, l'emploi des méthodes numériques du « clustering » a permis le développement de la taxinomie (la taxinomie ou taxonomie est la science des lois de la classification des formes vivantes).

Comme exemple d'algorithme de clustering, nous donnerons une méthode adaptative simple. On dispose d'observations $\mathbf{x}_1 \ldots \mathbf{x}_m$ dans un espace à *n* dimensions, et on suppose qu'il existe *k* classes. Chaque classe peut être représentée par un point particulier $M_i$ analogue à un centre de gravité. L'algorithme comprend les étapes suivantes :

* Prendre les *k* premiers vecteurs $\mathbf{x}_1 \ldots \mathbf{x}_k$ et les utiliser comme valeurs initiales de $M_1 \ldots M_k$ que nous appellerons $M_1(0) \ldots M_k(0)$.

* Quand le vecteur $\mathbf{x}(i)$ $(1 < i < m)$ se présente, l'affecter au groupe dont il est le plus proche, c'est-à-dire au groupe représenté par $M_j$ pour lequel la distance de $\mathbf{x}(i)$ à $M_j$ soit minimale pour $1 \leqslant j \leqslant k$.

* Calculer les nouveaux points représentatifs $M_l(i+1)$ (centre de gravité des groupes créés) :

• si $\mathbf{x}(i)$ n'a pas été mis dans le groupe *l*, $M_l(i)$ est inchangé ;

• si $\mathbf{x}(i)$ a été affecté au groupe *l*, on détermine

$$M_l(i+1) \text{ par } \mathbf{OM}_l(i+1) = \frac{1}{n_l(i)+1}(n_l(i)\,\mathbf{OM}_l(i) + x(i))$$

$n_l(i)$ est le nombre de points du groupe *l* quand se présente $\mathbf{x}(i)$. Un exemple va permettre de mieux comprendre le fonctionnement de cet algorithme. Soit la disposition de points présentés sur la *figure* 14 ; au départ $\mathbf{OM}_1(0) = x_1$ $\mathbf{OM}_2(0) = \mathbf{x}_2$ — on cherche à réaliser deux classes :

* on présente $\mathbf{x}_1$, il est affecté à la classe 1, donc rien de changé : $\mathbf{OM}_1(1) = \mathbf{OM}_1(0)$, $\mathbf{OM}_2(1) = \mathbf{OM}_2(0)$

* on présente $\mathbf{x}_2$, il est affecté à la classe 2, rien n'est changé : $\mathbf{OM}_3(2) = \mathbf{OM}_1(1) = \mathbf{OM}_1(0)$ et

$\mathbf{OM}_2(2) = \mathbf{OM}_2(1) = \mathbf{OM}_2(1) = \mathbf{OM}_2(0)$

* on présente $\mathbf{x}_3$, il est affecté à la classe 1 car $M_1(2)$ est le plus proche, donc $\mathbf{OM}_2(3) = \mathbf{OM}_2(2)$

$$\mathbf{OM}_1(3) = \frac{1}{1+1}(1 \cdot \mathbf{OM}_2(2) + \mathbf{x}_4) = \begin{pmatrix}1\\0{,}5\end{pmatrix}$$

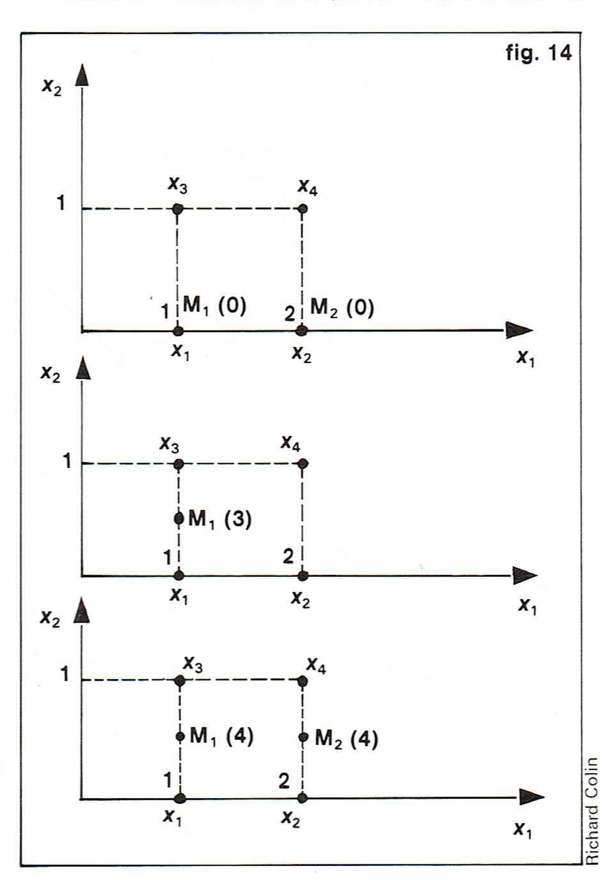
* on représente $\mathbf{x}_4$, il est affecté au groupe représenté par $M_2(3)$, c'est-à-dire à la classe 2, et en ce cas :

$$\mathbf{OM}_1(4) = \mathbf{OM}_1(3)$$

$$\mathbf{OM}_2(4) = \frac{1}{1+1}(1 \cdot \mathbf{OM}_2(3) + \mathbf{x}_4) = \begin{pmatrix}2\\0{,}5\end{pmatrix}$$

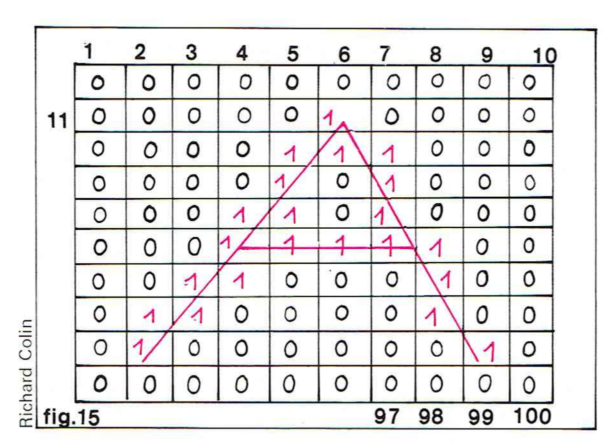
Si on continue, on constate que les groupes formés de $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_3\}$ et de $\{\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_4\}$ ne changent plus. En fait, si on avait posé d'autres conditions initiales ($\mathbf{x}_1$ et $\mathbf{x}_3$ par exemple), on aurait obtenu d'autres groupes, ce qui montre la sensibilité de cet algorithme. Mais il faut préciser aussi que dans notre exemple les calculs sont simples et qu'on peut former les groupes de deux vecteurs comme on le veut à cause du caractère symétrique de la figure.

Nous conclurons cette description rapide et non exhaustive des méthodes de reconnaissance des formes par la présentation des **techniques de sélection des caractères.** Trouver les caractères essentiels d'une forme permet souvent de franchir un grand pas vers la résolution du problème : qu'appelle-t-on « caractère » ? Une forme peut être représentée par un ensemble de mesures qui, s'il est important, demande une modélisation dans un espace de grande dimension. Trouver les caractères principaux ou essentiels, c'est obtenir un nombre plus faible de mesures représentatives afin de diminuer l'espace de modélisation. Prenons un exemple : la reconnaissance de




◀ *Figure 14 : évolution de l'algorithme de « clustering » développé dans le texte.*

► *Figure 15 : un exemple de technique de sélection des caractères, la reconnaissance des caractères écrits (voir développement dans le texte).*




caractères écrits. On va définir chaque lettre dans un carré 10 × 10 (*fig.* 15). Chaque carré élémentaire correspond à une composante d'un vecteur de dimension 100 : chaque composante du vecteur vaut 1 ou 0 suivant que le trait de la lettre passe ou non dans le carré correspondant. L'espace de représentation a donc pour dimension 100. Il peut être intéressant de diminuer cet espace pour le ramener à une dimension plus faible. Sans réfléchir, on pourrait proposer une grille de dimension plus réduite au départ, mais on diminuerait de ce fait la précision de la lecture. Aussi préfère-t-on essayer de recouper dans des lettres similaires les points permanents que l'on sélectionnera comme caractères. Plusieurs méthodes sont possibles.

Constituons une matrice X de dimension $n \times m$, chaque ligne représentant un objet par $m$ mesures. Ainsi l'objet $\mathbf{x}_i$ est décrit par $(x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{im})$. Supposons que chaque terme $x_{ij}$ représente en fait la somme pondérée de $k < m$ facteurs primitifs :

$$x_{ij} = a_{1j}f_{i1} + a_{2j}f_{i2} + \ldots + a_{kj}f_{ik}$$

Le terme $a_{lj}$ représente la contribution du $l$-ième facteur à la $j$-ième mesure ; la valeur $f_{ip}$ est une indication du lien entre l'objet $i$ et le caractère primitif $p$. En se donnant la matrice F de dimension $n \times k$ des facteurs, A la matrice des poids de dimension $k \times m$, on peut écrire :

$$X = F \cdot A.$$

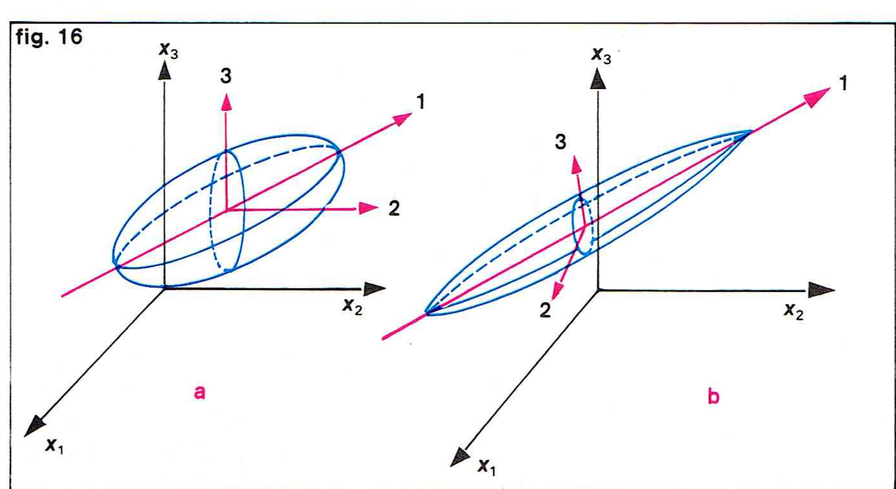
Le problème est de déterminer F et A à partir des mesures. La solution n'est pas unique, à moins d'imposer des contraintes supplémentaires.

Dans cet esprit, la méthode la plus utilisée est l'analyse en composantes principales dont nous allons donner les grandes lignes. On part de la matrice des corrélations des mesures R, c'est-à-dire de terme général $r_{ij}$ défini par :

$$r_{ij} = \frac{1}{n\sigma_x \times \sigma_y} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})\ (y_i - \overline{y})$$

avec : $\overline{x} = \frac{1}{n} \Sigma\, x_i$ et $\overline{y} = \frac{1}{n} \Sigma\, y_i$.

▼ *Figure 16 : représentation géométrique utilisée dans l'analyse en composantes principales (cas d'un espace à trois dimensions) ; a, le nuage de points a la forme d'un ellipsoïde allongé dans les directions principales (1) et (2) ; l'analyse en composantes principales conservera deux axes et le nuage de points sera représenté par sa projection dans le plan (1, 2) ; b, l'ellipsoïde est allongé et étroit dans deux directions ; l'analyse ne conservera que l'axe (1) et l'ensemble des points sera représenté par sa projection sur cet axe.*




Cette matrice est diagonalisée en une matrice

$$\Delta = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \ldots \\ 0 & \ddots & \ldots \\ \ldots & & \ldots \\ \ldots & & 0 \\ \ldots & \ldots\ 0 & \lambda_n \end{pmatrix}$$

Rangeons les valeurs propres $\lambda_i$ par ordre décroissant, c'est-à-dire $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \ldots \geqslant \lambda_n$. Soit Q la matrice formée des $k$ vecteurs propres associés aux $k$ valeurs propres les plus grandes. L'espace associé à ces $k$ vecteurs propres est l'espace des $k$ caractères.

Comment choisir $k$ ? On sait qu'il y a conservation de la trace, c'est-à-dire la somme des éléments diagonaux de la matrice dans toute transformation orthogonale. En ce cas, un bon indice de détermination de $k$ est la valeur exprimée en pourcentage du rapport

$$\frac{\sum_{i=1}^{k} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}$$

On prend l'ordre $k$ qui donne à ce rapport une valeur comprise entre 0,8 et 1. La méthode des composantes principales possède une représentation géométrique très simple : on modélise en fait l'ensemble des points-objets par un ellipsoïde dans l'espace à $n$ dimensions. Chaque facteur correspond à un des axes du volume. Celui correspondant à la valeur la plus grande est le grand axe, etc. Un exemple est donné sur la *figure* 16 dans le cas où $n = 3$. La *figure* 16a modélise le nuage de points par un ellipsoïde allongé dans deux directions (1) et (2), la troisième ayant peu d'importance. Par l'analyse en composantes principales, on conservera deux axes et on représentera le nuage de points par sa projection dans le plan (1, 2). Au contraire, dans la *figure* 16b, le nuage peut être modélisé par un ellipsoïde très allongé mais étroit dans deux directions. L'analyse en composantes principales ne conservera que l'axe (1), et l'ensemble des points sera représenté par sa projection sur cet axe : on est passé d'un espace à trois dimensions à un espace à une dimension.

Les combinaisons variées de techniques de détermination de caractères et de classification permettent de multiplier les solutions aux problèmes. Cependant, quand on recherche les caractères à utiliser pour un problème de classification, il semble logique d'éviter les méthodes mathématiques et d'utiliser les composants de base décrivant l'objet. Ainsi, un être humain est composé de bras, de jambes, d'une tête... Cependant, il y a de nombreux cas où une analyse plus poussée a montré que telle n'était pas la bonne voie et que de meilleures descriptions étaient possibles. Ainsi, de nombreux exemples montrent que certains caractères sont très utiles pour la classification, sans être de manière évidente descriptifs de l'objet. Reprenons le problème de la reconnaissance de caractères imprimés et limitons-nous aux dix chiffres. Le but est de reconnaître automatiquement un chiffre après l'avoir centré sur un cache sur lequel on a créé au préalable un réseau de lignes. Chaque ligne représente un caractère de l'objet. Le fait que la ligne $i$ soit coupée par le chiffre à reconnaître donne la valeur 1 à la $i$-ième composante du vecteur descriptif. Les différents chiffres produisent différents vecteurs descriptifs, ce qui permet la classification.

Dans ce paragraphe, nous n'avons qu'esquissé les méthodes utilisables en reconnaissance de formes ; ce domaine est en pleine évolution, comme le montre le nombre important de congrès consacrés à ce sujet dans le monde.

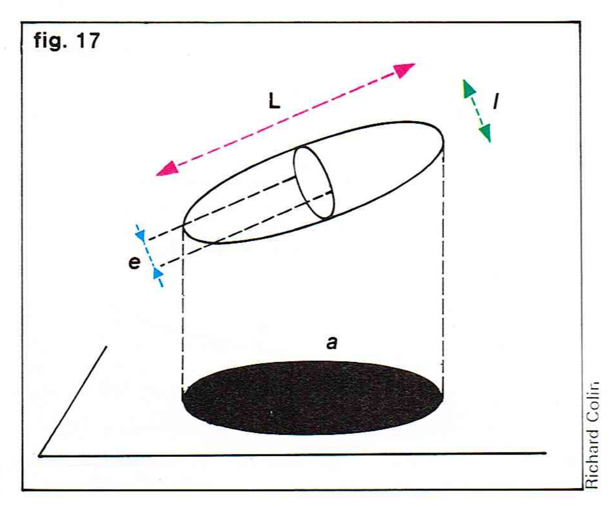
## *Un exemple d'emploi de la méthode de reconnaissance des formes : le tri des grains*

La méthode et l'application présentées ici ont été réalisées par William L. Brogan et Allen R. Edison à l'université de Nebraska. L'étude a été publiée dans la revue *Pattern Recognition* (vol. 6, 1974). Le problème est celui

du tri automatique de grains de céréales. Lors de la récolte ou du stockage des grains d'une espèce donnée, il se mélange souvent d'autres grains ou des impuretés. La qualité de pureté d'un stock est très importante : si le degré d'impureté est trop grand, il peut s'ensuivre une baisse du prix de vente. Étant donné les énormes quantités manipulées, la détermination de ce degré de pureté est particulièrement délicate.

La méthode employéeest fondée sur l'échantillonnage : on prélève suffisamment d'échantillons pour avoir une idée représentative du lot. Ces échantillons sont mesurés avec soin afin de déterminer le pourcentage d'impuretés. La méthode est coûteuse parce que fastidieuse et longue. Les auteurs ont alors proposé un appareil réalisant la classification automatique et rapide des grains en six espèces différentes. Pour résoudre ce problème, on a procédé en trois phases : saisie d'une grande quantité de données, c'est-à-dire, ici, de grains dans les six variétés considérées; puis plusieurs méthodes de sélection des caractères et de classification ont été essayées du point de vue de leur fiabilité sur les échantillons précédents; ensuite l'organe réalisant la classification a été construit et testé. L'organe effectue la prise mécanique des grains, la mesure optique, l'élaboration des informations pour le tri. Parmi les six variétés de grain considérées (maïs, blé, soja, avoine, seigle, orge), quatre présentent des formes elliptiques quasi équivalentes, ce qui ne simplifie pas le problème.

Quelles sont les contraintes ? Tout d'abord déterminer le pourcentage réel de blé contenu dans une cargaison de blé ainsi que les pourcentages éventuels des cinq autres grains. Pour l'instant, on ne se préoccupe pas de tri, mais simplement de la composition. La période d'échantillonnage a été fixée arbitrairement à une seconde : durant ce temps il faut donc effectuer les mesures nécessaires. Enfin, tous les calculs doivent être réalisés par un minicalculateur, car, sur le site, il est hors de question d'utiliser les possibilités d'un gros calculateur. Compte tenu de ces contraintes, il fut décidé de se limiter à quelques caractères principaux seulement. Ainsi, à partir des mesures de la longueur L, de la largeur $l$, de l'épaisseur $e$ et de la surface de projection $a$ (*fig.* 17), on élabore diverses fonctions $\frac{L}{l}, \frac{L}{e}, L\frac{l}{a}, \frac{a}{l}, \frac{a}{e}$, L$e$; d'autres mesures, quant au poids et aux propriétés de réflexion optique, avaient été prises, mais comme on n'était pas assez sûr de la qualité des capteurs employés, elles furent abandonnées; il en fut de même pour les propriétés diélectriques des grains. En fait, les quatre mesures de base sont suffisantes pour opérer la classification, comme on va le voir par la suite. Afin d'élaborer les corrélations, mille échantillons de chaque variété ont été mesurés. Cependant, chaque variété présente une dizaine de sous-variétés (à l'exception du seigle qui n'en a que six). On compte donc une centaine d'échantillons pour chaque sous-variété. On enregistre pour chaque échantillon les quatre mesures caractéristiques; ces mesures sont converties en binaire et mémorisées. Pour chaque sous-variété et variété, on élabore les valeurs moyennes, variances et corrélations données par les formules respectives :




$$\bar{x} = \frac{1}{N} \Sigma x_i \qquad \sigma_x = \frac{1}{N-1} \Sigma (x_i - \bar{x})^2$$

$$\rho_{xy} = \frac{\Sigma (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

Les quatre mesures L, $l$, $e$ et $a$ sont les composantes du vecteur caractère **x**. Notons les classes $C_1 \ldots C_6$. On fait l'hypothèse que pour chaque classe $C_i$, le vecteur **x** suit une loi de Gauss multidimensionnelle (c'est-à-dire ici de dimension 4). Cette loi est entièrement caractérisée si on se donne le vecteur moyenne $\mathbf{m}_i$ et la matrice de covariance $\Gamma_i$ c'est-à-dire $\mathbf{m}_i = E(\mathbf{x} \mid C_i)$ ; $\Gamma_i$ est la matrice de terme général $\rho_{kl}$, covariance des mesures des éléments de la classe $i$, et sa diagonale est formée des variances.

Le but de la sélection de caractères est de repérer les mesures ou combinaisons de mesures qui permettent la meilleure séparation des classes, pour laquelle il faut choisir un critère qui la précise. L'un est classique, il est fondé sur la distance de Mahalanobis [distance de la classe $C_i$ à la classe $C_j = (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)' \, \Gamma_j' \, (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)$ ; le signe ' indique la transposition]. L'autre critère est une indication des recouvrements partiels éventuels :

$$e_{ij} = \frac{P(\mathbf{x} \mid C_j) \mid \mathbf{x} = \mathbf{m}_i}{P(\mathbf{x} \mid C_j) \mid \mathbf{x} = \mathbf{m}_j}.$$

Ces deux quantités furent utilisées pour évaluer l'effet de fonction des mesures du type de celles énumérées ci-dessus $\left(\frac{L}{l}, \frac{L}{e} \ldots\right)$. En fait, quelle que soit la quantité utilisée, les mesures originelles de base suffisent amplement pour assurer la séparation.

A titre d'exemple, donnons quelques valeurs de $e_{ij}$. Pour le maïs $e_{ii} = 1$ évidemment, $e_{\text{maïs-blé}} = 0{,}00$, $e_{\text{maïs-soja}} = 0{,}79 \times 10^{-2}$, $e_{\text{seigle-avoine}} = 0{,}026$, $e_{\text{blé-orge}} = 0{,}18$.

Les valeurs fortes des coefficients $e_{ij}$ indiquent un risque de recouvrement. Ainsi, des échantillons d'orge peuvent souvent se trouver proches de ceux du blé. Le deuxième critère est en effet un bon indicateur de recouvrement : il calcule le rapport de la probabilité que **x** égale la moyenne de la classe $C_i$, alors que c'est un élément de la classe $C_j$, à la probabilité que **x** égale la moyenne de la classe $C_j$, alors que c'est un élément de $C_j$. Si ce nombre est très faible, il y a peu de recouvrement. Pour l'ensemble des variétés, le recouvrement est en général faible, sauf dans le cas blé-orge, ce qui indique bien que le choix des mesures directes est bon.

Il reste à résoudre maintenant le problème de la classification : à partir d'un grain dont on mesure les quatre quantités caractéristiques, il faut construire la suite de calculs permettant d'affecter ce grain à une classe donnée avec un risque minimal d'erreur. Plusieurs méthodes ont été testées. La plus simple d'entre elles a été d'utiliser une règle de proximité : on affecte le grain **x** à la classe $C_i$ dont la moyenne $\mathbf{m}_i$ est la plus proche. Rappelons que **x** est un vecteur dont chaque composante représente une des mesures effectuées sur le grain, $\mathbf{m}_i$ est un vecteur représentant la classe $C_i$, dont la première composante représente la longueur moyenne des grains de cette classe, la seconde composante la largeur moyenne, la troisième l'épaisseur moyenne et la dernière la surface moyenne de projection plane. La *figure* 18 représente la règle dans le cas de trois classes. Il faut donc se fixer une distance de $d(\mathbf{x}, \mathbf{m}_i)$ et en chercher le minimum pour les différents vecteurs moyennes $\mathbf{m}_1 \ldots \mathbf{m}_6$. La distance utilisée, dont nous ne détaillerons pas le calcul, tient compte des matrices de corrélation de chaque classe. Les résultats obtenus par cette méthode simple furent plutôt médiocres : les probabilités d'erreur de classement atteignaient pour certaines variétés 30 à 40 %. On ne peut dépasser une probabilité moyenne de succès de 0,85.

La seconde méthode fut fondée sur le théorème de Bayes :

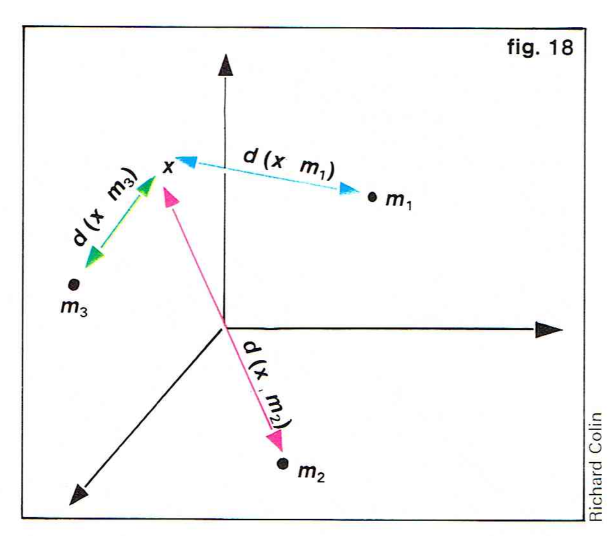
$$P(C_j \mid \mathbf{x}) = \frac{P(\mathbf{x} \mid C_j) \, P(C_j)}{\sum_{j=1}^{6} P(\mathbf{x} \mid C_j) \, P(C_j)}$$

Un échantillon **x** est classé dans le groupe $C_i$ si

$$P(C_i \mid \mathbf{x}) = \max P(C_j \mid \mathbf{x}),$$

◀ ***Figure 17 : les paramètres d'un grain de céréale utilisés lors du tri de grains en vue de la détermination de la pureté d'un lot de céréales.***

▶ *Figure 18 : voir développement dans le texte.*




c'est-à-dire dans la classe qui est pour lui la plus probable. L'emploi de cette règle demande que l'on connaisse les P ($C_i$) probabilités *a priori* des classes $C_1$ ... $C_6$. En fait, ces probabilités ne peuvent être connues de façon exacte, il faut donc les estimer à partir d'échantillons. Les auteurs ont proposé une méthode adaptative relativement complexe pour estimer ces probabilités *a priori*. A partir d'un échantillon de départ, les P ($C_i$) sont estimés, par exemple, pour la classe « blé », par le rapport

$$\frac{\text{nombre de grains de blé}}{\text{nombre total de grains}},$$

puis ces valeurs P ($C_1$) ... P ($C_6$) sont actualisées au fur et à mesure que se présente un nouveau vecteur **x** et qu'il est affecté à une classe ; on peut aussi partir de valeurs initiales P ($C_1$) ... P ($C_6$) arbitraires. Afin de tester l'ensemble, divers échantillons de grains de tailles différentes appartenant à des variétés délicates à trier ont été collectés. Au départ, $P(C_1) = P(C_2) = ... = P(C_6) = \frac{1}{6}$, c'est-à-dire que l'on suppose l'équiprobabilité des classes.

Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants. Il n'y a pratiquement aucune erreur pour le maïs et pour le soja ; en revanche, les autres variétés sont relativement semblables, et le taux d'erreur augmente. On peut cependant faire descendre ce taux d'erreur jusqu'à 2 % si on applique avec soin la méthode décrite. Précisons que le processus est automatisé depuis la saisie de données jusqu'au classement.

Cet exemple montre bien la variété des domaines dans lesquels les techniques de reconnaissance des formes peuvent s'appliquer.

## Une autre application : le contrôle de qualité

Le contrôle de qualité joue un grand rôle dans la production industrielle : il permet de vérifier une fabrication par sa conformité aux normes. Comme, dans les productions de grande série, il est hors de question de vérifier chaque pièce, on procède encore par échantillonnage ; des propriétés du lot mesuré, on déduit la qualité de la production. Au contraire, dans le cas d'une production limitée, on peut vérifier chaque élément de la fabrication et effectuer ainsi un contrôle de qualité exhaustif. Ce domaine a donné et donne encore lieu à de nombreux travaux. En général, on ne classe pas un produit en « bons » ou « mauvais » : il existe une gradation pour aller de l'un à l'autre.

Pourquoi ne pas employer des algorithmes de reconnaissance de formes ? Le vecteur-objet est constitué par les différentes mesures effectuées sur l'élément, et les classes traduisent les différents degrés de qualité. Le problème, bien que simplement posé, est généralement complexe à résoudre ; l'exemple que nous allons exposer ne s'applique qu'à un produit fini simple. Nous supposerons également résolus les différents problèmes de mesure : tous les facteurs intervenant dans le niveau de qualité sont mesurés quantitativement, ce qui est loin d'être toujours le cas pour les produits industriels. En fait, on peut distinguer deux sortes de variations sur le produit fini : les variations dues à la qualité du produit servant à la fabrication, les facteurs humains que l'on ne peut contrôler et les variations repérables que l'on peut identifier ou contrôler. Le contrôle de qualité a pour but de séparer ces deux causes de variations. Dans un système de reconnaissance de formes, il convient de sélectionner ce que nous avons appelé les caractères. Dans le cas présent, ils vont être extraits des distributions des fréquences des mesures.

Dans un premier temps, la production est divisée en lots, de manière que, dans un lot, les causes de variation soient les mêmes pour chaque objet produit : par exemple, la production d'une machine forme un lot. Plaçons-nous maintenant dans un lot et supposons, pour simplifier, qu'on ne réalise que deux mesures statistiques, la moyenne et l'écart-type d'une cote. Pour la première composante $x_1 = m$, on remarque que la plus grande partie des valeurs trouvées sont dans un intervalle $[m_0 - \delta, m_0 + \delta]$. Si la valeur mesurée sur la pièce se trouve dans cet intervalle, on décide que le premier caractère $X_1$ vaut 1 ; sinon qu'il vaut 0. De la même façon, on peut constater généralement dans l'intervalle

$$[\sigma_0 - \varepsilon, \sigma_0 + \varepsilon].$$

Si tel est le cas, on affecte la valeur 1 au deuxième caractère $X_2$ ; sinon on lui affecte la valeur 0. Dans le plan ($x_1$, $x_2$), on peut alors définir quatre niveaux de qualité (*fig.* 19) :

Qualité 1 : $m_0 - \delta \leqslant m \leqslant m_0 + \delta$
et $\sigma_0 - \varepsilon \leqslant \sigma \leqslant \sigma_0 + \varepsilon$

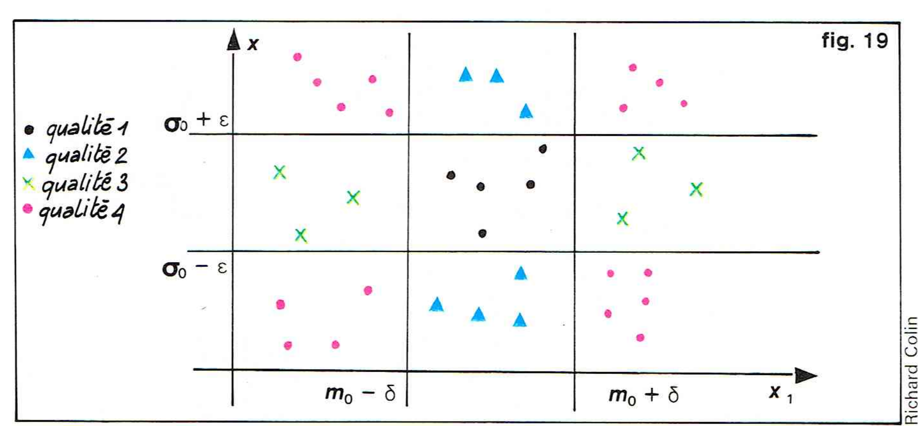
Qualité 2 : $m_0 - \delta \leqslant m \leqslant m_0 + \delta$
$\sigma < \sigma_0 - \varepsilon$ ou $\sigma > \sigma_0 + \varepsilon$

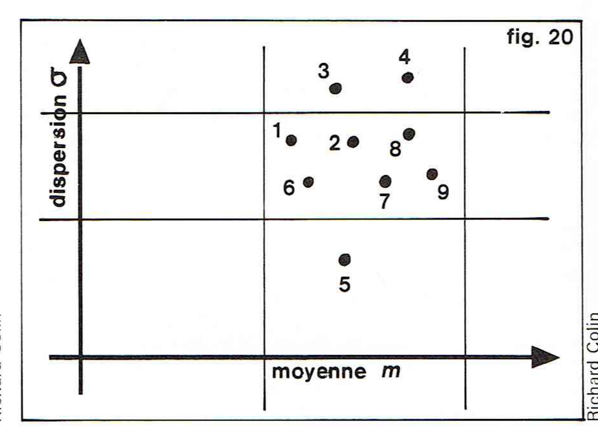
Qualité 3 : $m < m_0 - \delta$ ou $m > m_0 + \delta$
$\sigma_0 - \varepsilon \leqslant \sigma \leqslant \sigma_0 + \varepsilon$

Qualité 4 : complémentaire de 1, 2, 3.

A chaque qualité on associe donc un mot $X_1X_2$ dont les différentes valeurs sont les suivantes : qualité 1 (11), qualité 2 (10), qualité 3 (01), qualité 4 (00). A chaque mot on peut associer une action : à « 11 », aucune correction à apporter, la production est bonne ; à « 10 », il faut jouer sur les dispersions de fabrication, ce qui peut être

▼ *Figure 19 : exemple de contrôle de qualité d'un lot de pièces par l'étude des moyennes m et de l'écart-type d'une cote, et la définition de quatre niveaux de qualité.*
*Figure 20 : classification des éléments lors du contrôle de qualité ; les éléments 3, 4, 5 sont attribués à la classe 1 et les autres à la classe 2.*



coûteux ; à « 01 », il faut agir sur la moyenne de la production ; à « 00 » il faut tout revoir : rien ne va plus !

Le lecteur familiarisé avec le contrôle de qualité reconnaît ici des cartes de contrôle à deux dimensions. Sans entrer dans le détail de l'élaboration de ces cartes, nous constatons que le problème ainsi défini est un problème de reconnaissance des formes. Il suffit donc, par exemple, de vérifier que les vecteurs objet sont bien dans le cercle de centre $(m_0, \sigma_0)$ et de rayon $\sqrt{\delta^2 + \varepsilon^2}$ pour dire que la production se classe dans la qualité 1. Dans ce problème simplifié, n'importe quel algorithme peut être utilisé. Il faut cependant faire attention à un point : le contrôle de qualité est un problème statistique et, sur un échantillon, la majorité des vecteurs observés peut appartenir à la qualité 1 tandis que certains autres peuvent être de qualité 3 ou 4 ou l'inverse. Il faut donc élaborer des algorithmes de classement, soit séquentiels, soit à décision majoritaire.

Dans le premier cas, chaque élément de l'échantillon est repéré par son temps de fabrication : ainsi, les quelques éléments de l'échantillon qui ne sont pas classés de la même façon que les autres peuvent être attribués à des phénomènes transitoires. Sur la *figure* 20, les éléments 3-4-5 (ordre historique) sont mis en classe 2, tandis que la majorité est en classe 1 ; cela pourra peut-être s'expliquer en examinant s'il n'y a pas eu, par exemple, une modification de réglage.

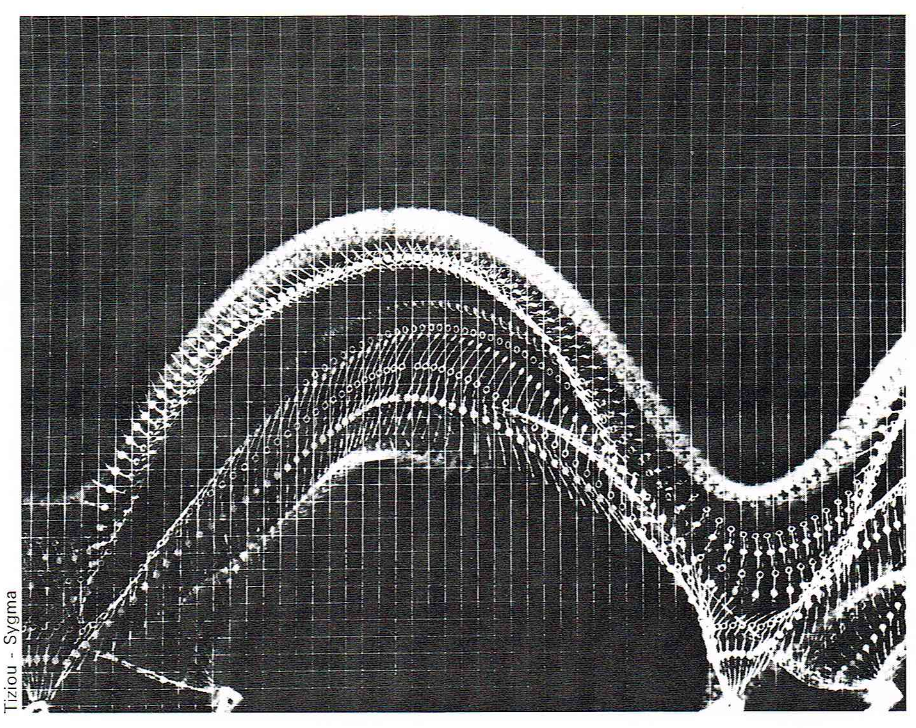
Ce bref paragraphe avait pour but de montrer une autre application, moins attendue, de la reconnaissance des formes. Les algorithmes n'ont pas été développés, et seul un exemple simple a été esquissé. L'emploi de ces techniques peut avoir pour effet de permettre un classement plus rapide et plus fiable dans les différents niveaux de qualité. De plus, la précision des algorithmes laisse espérer une sophistication du contrôle de qualité entraînant une meilleure exploitation des moyens de production.

## *Traitement d'images*

Notre propos est ici de présenter succinctement les méthodes automatiques d'analyse d'images, dont le but est de pouvoir exploiter une image fournie par une caméra, c'est-à-dire de pouvoir décrire la scène vue. Une des premières applications développée fut la reconnaissance optique de caractères : c'est plus un problème de classification que de description, on peut donc se référer au paragraphe précédent. D'autres applications particulièrement importantes sont fournies par la physique (exploitation des clichés des chambres à bulles, par exemple) ou le domaine biomédical (exploitation des images fournies par des microscopes). Le problème du traitement d'image est complexe : actuellement, sa résolution n'est pas toujours possible. Reprenons le premier exemple ci-dessus, la reconnaissance automatique de caractères, que nous avons paru présenter comme simple. Sont-ce des caractères manuscrits ou conçus par des machines ? Dans le second cas, quel type de machine ? Dans le premier cas, sera-ce toujours la même personne qui écrit ou y aura-t-il plusieurs personnes ? Autant de questions dont les solutions permettent ou non de simplifier les solutions proposées. L'étendue des problèmes est telle qu'il serait naïf de croire qu'un ensemble de techniques bien répertoriées suffirait à résoudre tous les cas.

La première étape à franchir est de transformer une image, représentée peut-être par des dizaines de milliers de bits d'information, en une description qui tienne en quelques dizaines de bits seulement. Nous présenterons dans ce court exposé quelques techniques utilisées pour simplifier les images en éliminant les détails jugés sans importance et en caractérisant mieux les formes et volumes.

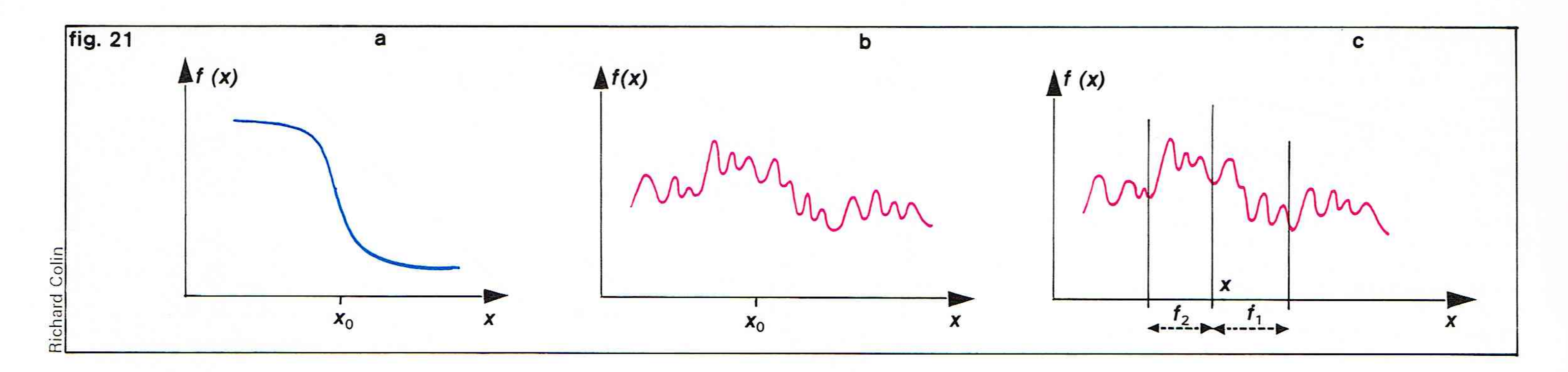
Supposons donc qu'on dispose d'un négatif photographique et qu'on désire l'analyser par un calculateur digital. La première transformation nécessaire est de trouver une représentation que la machine puisse comprendre. Il y a plusieurs façons de procéder ; la plus simple est encore de dire qu'une image noir et blanc peut se représenter par une fonction $f(x, y)$ à deux arguments : $f(x, y)$ est proportionnelle à l'intensité lumineuse au point $(x, y)$ de l'image. Une fois l'image remplacée par un tableau des valeurs de la fonction $f(x, y)$, les différentes représentations possibles dans un calculateur


Tiziou - Sygma

▲ ***La radiographie d'un squelette de dinosaure ? En fait, il s'agit de l'étude photographique d'un homme sautant sur un simulateur de gravité humaine (étude réalisée à Northrop Space Laboratories, en Californie, en accord avec la NASA) ; de telles études nécessitent l'utilisation de méthodes automatiques d'analyses d'images car elles ne sont pas parlantes et prêtent à confusion.***

correspondent aux différentes représentations d'une fonction. En général, il est rare qu'une fonction d'image $f(x, y)$ ait une expression analytique connue. Aussi, le plus simplement du monde, échantillonne-t-on $f(x, y)$ en un certain nombre de points du plan de l'image et mémorise-t-on les valeurs obtenues : c'est le **procédé de quantification.** Ce procédé repose sur la position des points choisis. Généralement, on couvre l'image d'un quadrillage et on prend les valeurs de $f(x, y)$ au centre de chaque carré élémentaire. Cependant, d'une part, il y a une infinité de nuances entre le noir et le blanc, d'autre part, la représentation digitale des nombres en machine est limitée. On doit donc aussi quantifier les valeurs de $f(x, y)$. Ce travail effectué, l'image est représentée par un ensemble de nombres, chacun rendant compte de la luminosité en un point précis. Pour quantifier $f(x, y)$, il y a plusieurs solutions. Une première idée est de diviser l'échelle entre « noir » et « blanc » en intervalles égaux, mais rien n'oblige à une augmentation linéaire. Ainsi, si les images étudiées ont une forte tendance au noir, on peut désirer une échelle fine dans les « noirs » et, au contraire, moins précise pour les « blancs ». On peut aussi, si on n'a aucun *a priori*, utiliser le modèle fourni par l'œil humain, qui semble présenter une réponse approximativement logarithmique à la lumière. En d'autres termes, des modifications logarithmiques de l'intensité lumineuse sont ressenties par l'œil humain comme apparemment arithmétiques. Si on prend l'œil pour modèle, il vaut donc mieux quantifier de façon uniforme $\log f(x, y)$ que $f(x, y)$.

La seconde quantification qui intervient est, on l'a vu, le quadrillage de l'image. A la différence du problème précédent, il existe ici un support théorique constitué par le théorème de Shannon, puisqu'on procède en fait à un échantillonnage à deux dimensions. La discussion nous entraînerait dans des développements trop importants, puisqu'elle fait appel à la transformée de Fourier de fonctions à deux arguments. On verra plus loin que le quadrillage présente certains inconvénients : en particulier, deux carrés peuvent avoir un angle commun sans avoir de côté commun, ce qui est gênant pour des problèmes d'identification de formes. Aussi certains auteurs ont-ils préconisé une partition en hexagones élémentaires plutôt qu'en carrés, mais les gains obtenus ne compensent pas la complexité du problème. Dans la suite de cet exposé, l'image sera représentée par un tableau ou une matrice de terme général $f(i, j)$, valeur quantifiée de $f(x, y)$ au centre du carré $(i, j)$. Les valeurs faibles de $f(i, j)$ correspondront au « noir », les valeurs fortes au « blanc ». Tout le traitement d'images va s'effectuer à partir de la matrice : si l'échantillonnage est mauvais, des objets pourront être confondus, des frontières imprécises, etc.




▲ *Figure 21 : problème de l'obtention d'une transition lors de l'étude des tracés des contours d'objets (dans le cas d'une représentation monodimensionnelle) ; a, f (x) théorique ; la transition est bien marquée ; b, f (x) réelle, la transition est difficile à observer ; c, on réalise deux fenêtres de largeur $f_1$ et $f_2$, puis des moyennes afin de repérer la transition.*

▼ *Figure 22 : cas bidimensionnel (voir développement dans le texte).*

fig. 22

| | | |
|---|---|---|
| $f_{11}$ | $f_{12}$ | $f_{13}$ |
| $f_{21}$ | $f_{22}$ | $f_{23}$ |
| $f_{31}$ | $f_{32}$ | $f_{33}$ |

Richard Colin

Le processus du traitement d'images est en général un processus de simplification : un objet relativement complexe, l'image, est transformé en une forme plus simple par toute une succession d'étapes. Une de ces premières étapes est de convertir l'image en un dessin de silhouette. S'il est souhaitable, évidemment, que l'image transformée conserve la majeure partie de l'information dont on disposait, les calculs qui suivent pourront, grâce à cette transformation, être de beaucoup simplifiés. L'expérience montre d'ailleurs que l'homme concentre énormément d'attention visuelle sur les contours des objets.

Examinons maintenant comment obtenir le **tracé des contours** des objets, sans se préoccuper du but ultérieur poursuivi. Un tracé des contours peut être obtenu en amplifiant les zones de l'image où il y a des transitions noir-blanc et en éliminant ou estompant les zones d'intensité lumineuse homogène. En effet, les contours sont des arêtes, et les arêtes sont par définition des zones de transition entre deux parties d'intensité lumineuse différente. Traduite en termes mathématiques, une arête est une région du plan de l'image où $f(x, y)$ présente un gradient important (rappelons que pour une fonction $g(x, y)$, le vecteur gradient est le vecteur formé par les dérivées partielles $\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y}$ ; un gradient important marque donc une transition dans les valeurs de la fonction). Il suffit donc, pour résoudre notre problème, de calculer le gradient de la fonction intensité $f(x, y)$. On peut l'estimer à l'aide de la fonction suivante :

$$\|\nabla f(i, j)\| \sim R(i, j) =$$
$$\sqrt{[f(i,j) - f(i+1, j+1)]^2 + [f(i, j+1) - f(i+1, j)]^2}$$

$\nabla f(i, j)$ se lit gradient de $f$ au point $(i, j)$. (« $\nabla$ » est le symbole « nabla » ; $\| \cdot \|$ indique la norme du vecteur.) Cette fonction $R(i, j)$ a été très utilisée. Examinons les différents cas possibles. Si le point $(i, j)$ est dans une région d'intensité lumineuse homogène, $R(i, j)$ vaut alors 0, car $f(i, j)$ est peu différent de $f(i+1, j+1)$ et $f(i, j+1)$ de $f(i+1, j)$. S'il y a une discontinuité lumineuse entre la colonne $(j+1)$ et la colonne $j$, $R(i, j)$ prend une grande valeur, de même pour une discontinuité entre la ligne $i$ et la ligne $(i+1)$. Pour simplifier les calculs, on emploie souvent $G(i, j)$ où la valeur absolue remplace l'élévation au carré :

$$G(i, j) =$$
$$|f(i,j) - f(i+1, j+1)| + |f(i, j+1) - f(i+1, j)|.$$

On a :

$$R(i, j) \leqslant G(i, j) \leqslant \sqrt{2}\, R(i, j),$$

mais $G(i, j)$ est beaucoup plus rapide à calculer.

Il y a un *problème de seuil :* à partir de quelle valeur de $G(i, j)$ ou $R(i, j)$ décide-t-on qu'il y a arête ? Si on place ce seuil trop haut, on va manquer des arêtes ; si on le place trop bas, l'effort de simplification ne servira à rien. Examinons plus attentivement ce problème : la difficulté vient de ce qu'on n'a jamais une transition nette comme indiqué *figure* 21a (où on a figuré une transition uniquement sur la dimension $x$). En reprenant le schéma utilisé dans la partie consacrée à l'analyse du signal, on peut représenter $f(i, j)$ comme somme de deux termes :

$$f(i, j) = s(i, j) + n(i, j) ;$$

$s(i, j)$ représente une fonction intensité idéale réalisant des transitions brusques sur les arêtes ; $n(i, j)$ représente un terme de bruit. L'idéal serait donc pour nous d'estimer le gradient de $s$ et non celui de $f$.

Ainsi, pour donner une représentation monodimensionnelle, la *figure* 21a représente $s(x)$ et la *figure* 21b $f(x)$ observé. Le problème est d'estimer $x_0$ au point de transition du « blanc » au « noir » malgré le terme $n(i, j)$. Intuitivement on peut effectuer une opération de type moyenne comme celle qui a été décrite pour extraire un signal du bruit. Nous pourrions lisser la fonction $f$ de façon à minimiser l'effet du bruit : l'inconvénient d'un tel lissage est qu'il risque de faire disparaître aussi la transition. Pour le pallier, on peut opérer sur deux zones mobiles de la fonction $f(x, y)$.

Reprenons un exemple de cas monodimensionnel comme indiqué sur la *figure* 21c. On effectue une moyenne du signal sur $[x, x + f_1]$ et une autre sur $[x - f_2, x]$, donc sur deux « *fenêtres* » de longueur respective $f_1$ et $f_2$ autour du point $x$. En déplaçant le point $x$ et en effectuant systématiquement la différence des moyennes obtenues, on peut espérer repérer la transition. Le choix de la largeur des fenêtres est critique, puisqu'elles ne doivent pas être trop étroites, et donc inférieures à la durée de la transition qui n'est jamais instantanée, ni trop grandes, et qu'elles doivent intégrer le passage du « blanc » au « noir ». Nous avons fait le raisonnement à une dimension : les résultats obtenus sont généralement bons dans le cas de cette méthode.

Dans le cas bidimensionnel, il faut utiliser les deux méthodes décrites : d'une part, le moyennage, d'autre part, des opérations de type fenêtre. Donnons un exemple, suggéré par I. Sobel, où le gradient est mesuré à l'aide d'une fenêtre 3 × 3. Pour simplifier, nous n'avons représenté sur la *figure* 22 que la partie de l'image dans la fenêtre considérée. Le gradient au point (2, 2) est défini par $\|\nabla f_{22}\| = \sqrt{A^2 + B^2}$

avec $A = (f_{13} + 2 f_{23} + f_{33}) - (f_{11} + 2 f_{21} + f_{31})$

et $B = (f_{31} + 2 f_{32} + f_{33}) - (f_{11} + 2 f_{12} + f_{13})$.

En fait, A représente une estimation de la dérivée partielle de la fonction intensité dans la direction $x$ : on crée en effet la différence de deux estimations de la fonction intensité en (2, 3) et (2, 1). Ces deux estimations sont pondérées par les valeurs qui les entourent. De même, on peut dire que B représente l'estimation de la dérivée partielle dans la direction orthogonale. Il est à noter que les valeurs données aux poids pour tenir compte des valeurs qui entourent le point considéré sont ici intuitives.

Dans le paragraphe précédent, nous avons utilisé la technique éprouvée du **moyennage** pour combattre le bruit dans le but d'obtenir les contours des objets représentés sur une image. Cette technique peut être aussi employée pour combattre tout effet de bruit. Comme auparavant, l'idée est de remplacer la valeur de la fonction luminosité en un point, valeur entachée de bruit, par une fonction pondérée des valeurs prises autour de ce point. Le moyennage ne doit pas être trop important afin de ne pas tout estomper.

Pour simplifier l'exposé sans détruire la généralité, nous nous placerons encore dans le cas monodimensionnel. Pour toute fonction $f(x)$, on définit

$$f_u(x) = \frac{1}{u} \int_{x - \frac{u}{2}}^{x + \frac{u}{2}} f(z)\, dz.$$

$f_u(x)$ représente la valeur moyenne de $f(x)$ sur l'intervalle $\left(x - \frac{u}{2}, x + \frac{u}{2}\right)$.

Prenons quelques exemples pour constater l'effet de cette opération. Sur la *figure* 23a, nous avons représenté une fonction $f(x)$ discontinue en un point : le résultat est la disparition de cette discontinuité. Par contre, une fonction $f(x)$ continue est transformée en une fonction continue à dérivée continue (*fig.* 23b). Le rôle de la largeur de fenêtre est prédominant. Plus $u$ est faible, moins l'effet de l'opération moyenne se fait sentir, et $f_u(x)$ est très proche de $f(x)$ : $f_u(x)$ s'appelle *moyenne mobile* de $f(x)$.

Étendons maintenant la définition précédente au cas bidimensionnel ; on se donne une fenêtre spatiale de surface $S_u$, et on définit la moyenne mobile de $f(x, y)$ par $f_u(x, y) = \frac{1}{S_u} \iint_{u(x,y)} f(u, v)\, du dv$ ; [($u(x, y)$ est la fenêtre de surface $S_u$ centrée en $(x, y)$]. Puisqu'on opère sur des valeurs échantillonnées, la double intégrale précédente se ramène à une somme double :

$$f_u(i, j) = \sum_{kl} \frac{f(k, l)}{S_u}$$

Si on se fixe une fenêtre de forme rectangulaire de base $(2a + 1)$ et de hauteur $(2b + 1)$, la moyenne mobile de $f(i, j)$ s'écrit :

$$f_u(i, j) = \frac{1}{(2a+1)(2b+1)} \sum_{-b<k<b} \; \sum_{-a<l<a} f(i+k, j+l).$$

Pour les lecteurs familiers de la technique photographique, remplacer la fonction intensité par sa moyenne mobile provoque le même effet sur l'image que de détruire la mise au point d'un objectif. Mais le but poursuivi, lorsqu'on effectue une photographie, est en général contraire (à moins de rechercher le « flou artistique ») : on désire une photo nette dont les éléments aient des contours précis. Aussi l'opération moyenne mobile décrite n'est-elle employée que pour certains buts bien délimités.

L'une des applications qui rendent cette transformation nécessaire est le traitement des images binaires. Une image est dite binaire si on n'autorise la fonction $f(i, j)$ à prendre que deux valeurs : 0 (noir) et 1 (blanc). La fonction intensité renforce donc les contrastes. En général, on appelle sujet de l'image l'ensemble des carrés élémentaires où $f(i, j)$ vaut 1 ; le reste est appelé le fond. Ces images binaires sont obtenues à partir de l'image mère, soit après un traitement de l'image digitalisée (ainsi l'image des contours est une image binaire), soit directement ($f(i, j)$ est fixée dès le départ à deux valeurs). Pour lisser $f(i, j)$ dans une image binaire, il suffit de comparer $f_u(i, j)$ à un seuil. Si ce seuil est dépassé, la valeur de la fonction intensité en ce point vaudra 1, sinon elle vaudra 0.

Prenons un exemple simple extrait de l'ouvrage de O. Duda et E. Hart : une image est représentée dans un quadrillage $7 \times 7$ (*fig.* 24a). Choisissons une fenêtre de dimensions $3 \times 3$ et un seuil de 0,4. Ainsi, au point A de la *figure* 24a, $f(i, j)$ vaut 1 ; calculons $f_u(i, j)$ :

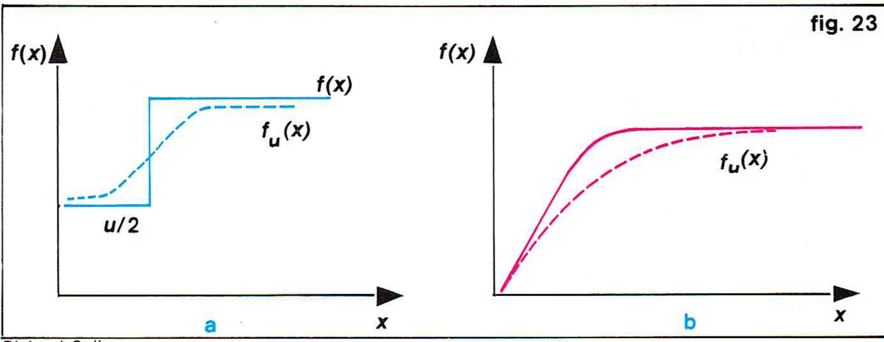
$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(1 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 0 + 1 + 1) = 0{,}56 > 0{,}4.$$

Donc, au point A' de la *figure* 24b, homologue du point A, la fonction intensité est fixée à la valeur 1. Effectuons le même calcul pour le point B de la *figure* 24a, $f(i, j) = 1$ :

$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(0 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1) = \frac{3}{9} = 0{,}33.$$

En B', $f(i, j)$ vaudra donc 0. La *figure* 24b donne l'équivalent de la *figure* 24a après l'opération moyenne mobile. Prenons maintenant l'image de la *figure* 24c où existent deux taches séparées. Ici en A, $f(i, j)$ vaut 1. Calculons $f_u(i, j)$ :

$$f_u(i, j) = \frac{1}{9}(0 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 1) = \frac{4}{9} = 0{,}44 > 0{,}4.$$



Richard Colin

Donc, en A' de la *figure* 24d, $f(i, j)$ vaut 1. On constate alors sur la *figure* 24d que le résultat est une image où les deux taches ne sont plus séparées. Si cette séparation avait un intérêt, l'opération moyenne mobile a fait perdre de l'information.

Ces deux exemples montrent bien les précautions à prendre en effectuant l'opération moyenne mobile.

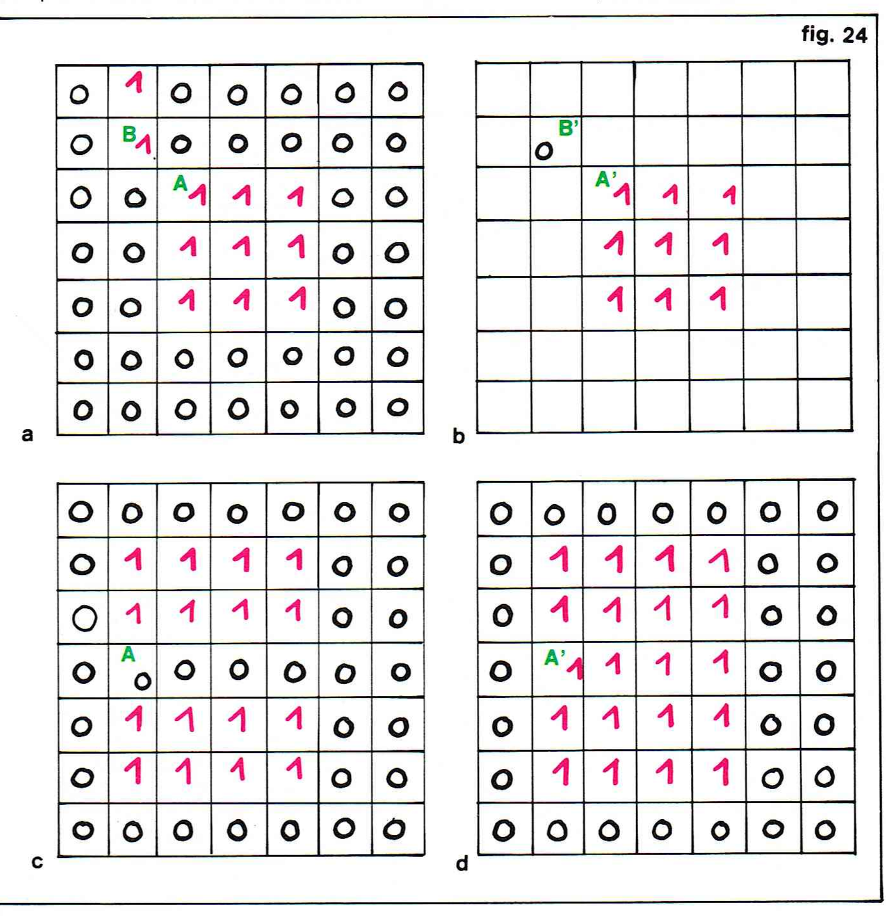
Dans le cas particulier d'images binaires, il existe une autre transformation dont le résultat est aussi un lissage, mais plus contrôlable que le précédent, le **lissage logique.** La fonction $f(i, j)$ ne prenant dans les cellules élémentaires que les valeurs 0 ou 1, on peut la considérer comme une variable booléenne : la valeur lissée de la fonction est alors choisie comme résultat d'une fonction booléenne, et le problème du seuil n'existe plus.

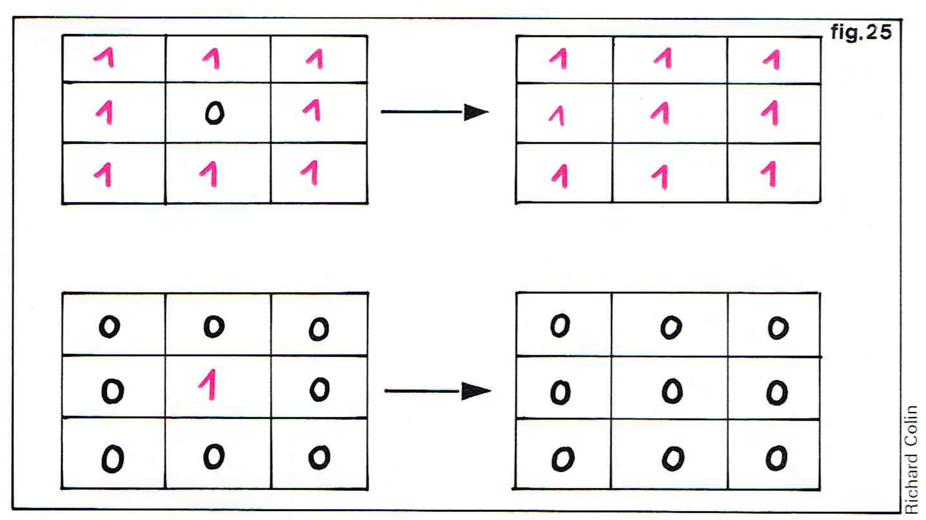
Soit l'exemple suivant : la valeur de la fonction lissée vaudra 1 si la valeur antérieure de la fonction valait 0 et si tous les carrés limitrophes étaient à la valeur 1 ; la valeur de cette fonction lissée vaudra 0 si la valeur antérieure était 1 et si tous les carrés voisins étaient à la valeur 0. Dans les autres cas, la fonction lissée est égale à la fonction antérieure.

Des exemples sont donnés sur la *figure* 25. Il y a en fait complémentation des valeurs isolées aux valeurs qui les

▲ *Figure 23 : utilisation de la technique du moyennage pour le traitement d'images dans le cas monodimensionnel : a, fonction $f(x)$ [discontinue] en un point et $f_u(x)$ [disparition de la discontinuité] ; b, fonction $f(x)$ [continue] et fonction $f_u(x)$ moyennée [avec dérivée continue].*

▼ *Figure 24 : un exemple de traitement d'image binaire ; a, représentation de l'image dans un quadrillage 7 × 7 ; b, choix d'une fenêtre de dimensions 3 × 3 et d'un seuil de 0,4 ; c, cas d'une image avec deux taches séparées ; , après calcul de la moyenne mobile, les deux taches ne sont plus séparées.*






▲ ***Figure 25 : quelques exemples de transformations par lissage logique dans le cas particulier d'images binaires.***

entourent ; c'est un bon procédé pour lutter contre certains bruits dont l'effet est de changer aléatoirement certaines valeurs de $f\ (i, j)$. Pour l'image de la *figure* 26, le point où $f\ (i, j)$ valait $f_{22}$ prend la valeur $f_{u22}$ donnée par la formule suivante :

$$f_{u22} = \overline{f}_{22}\ (f_{11} \cdot f_{12} \cdot f_{13} \cdot f_{23} \cdot f_{21} \cdot f_{31} \cdot f_{32} \cdot f_{33}) + f_{22}\ (f_{11} + f_{12} + f_{13} + f_{21} + f_{23} + f_{31} + f_{32} + f_{33})$$

(« · » : opération ET, « + » : opération OU).

Ainsi, si

$$f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 1$$

et si $f_{22}$ vaut 0, alors :

$$f_{u22} = 1\ (1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) + 0\ (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 1.$$

Si $f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 0$

et si $f_{22} = 1$, alors :

$$f_{u22} = 0\ (0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0 \cdot 0) + 1\ (0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0) = 0.$$

Prenons maintenant le cas où

$$f_{11} = f_{13} = f_{21} = f_{23} = f_{31} = f_{32} = f_{33} = 1, f_{22} = f_{12} = 0.$$

alors :

$$f_{u22} = 1\ (1 \cdot 0 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) + 0\ (1 + 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1) = 0,$$

il n'y a donc aucun changement. La définition de la fonction booléenne prise correspond bien aux contraintes fixées plus haut. Puisqu'on sait définir quantité de fonctions booléennes, le processus de lissage est beaucoup plus contrôlable quand on utilise ce genre de technique.

**fig. 26**

| | | |
|---|---|---|
| $f_{11}$ | $f_{12}$ | $f_{13}$ |
| $f_{21}$ | $f_{22}$ | $f_{23}$ |
| $f_{31}$ | $f_{32}$ | $f_{33}$ |

Richard Colin

▲ ***Figure 26 : lissage logique dans le cas d'images binaires (voir développement dans le texte).***

▼ ***Figure 27 : essai de reconnaissance d'un carré ; a, forme type qui sera déplacée sur l'image dont on veut reconnaître la forme ; b, grâce au carré type, on essaie de retrouver une région blanche entourée de zones sombres.***

**Reconnaissance d'objets.** Le traitement d'images est utilisé en tant que traitement d'un signal d'un capteur particulier : une caméra de télévision saisit la scène devant elle et des algorithmes sont utilisés pour reconnaître des objets. Si un objet recherché s'y trouve, une action s'ensuivra. Comme illustration, on peut imaginer un bras mécanique dont la fonction est d'assembler plusieurs pièces (deux cylindres concentriques par exemple). Sur l'image fournie par la caméra, il faut reconnaître tout d'abord le plus grand cylindre, le saisir, l'amener sur une plate-forme, reconnaître et aller chercher le petit cylindre. L'exploitation d'une image exige donc la reconnaissance d'objets. Nous allons maintenant traiter de ce sujet.

La technique utilisée est encore l'homologue d'une méthode d'analyse du signal, l'adaptation à une forme type. Afin de simplifier l'exposé, raisonnons encore sur des images binaires et partons d'une image de contours qui en est un bon exemple. On désire reconnaître un carré, par exemple. Une méthode simple consiste à créer une forme type (*fig.* 27a) et à la déplacer sur l'image dans toutes les positions possibles. Si, dans une des positions, le « creux » du carré type est rempli de blanc, on pourra décider qu'on a repéré un carré. Cette méthode suppose que la dimension du carré type correspond exactement à celle de la forme que nous recherchons. Si la forme type est, par exemple, plus petite, il peut exister des positions dans l'image où le « creux » sera rempli de blanc sans pour cela qu'on soit certain d'avoir reconnu un carré. Pour remédier à cette incertitude, on peut essayer de retrouver directement une région blanche entourée de zones sombres. C'est ce que nous indiquons sur la *figure* 27b. En utilisant ce carré type, on dit qu'on reconnaît un carré si les zones successives A, B, C correspondent sur l'image à des zones respectives 0, 1, 0. Notons que cette forme type est aussi celle d'une image binaire et que la taille du carré type doit être plus faible que celle de l'image, puisqu'on recherche un sous-ensemble de celle-ci.

Dans les applications réelles, on n'a jamais l'accord parfait indiqué ci-dessus, et on doit se donner une mesure du degré d'accord entre un sous-ensemble de l'image et la forme type. Soit $f\ (i, j)$ la fonction intensité de l'image, $c\ (i, j)$ celle du carré type, D son domaine de définition (D est plus faible que l'image). Une indication du degré d'accord peut être donnée par la fonction suivante :

$$A\ (m, n) = \sum_{i,j} |\ f\ (i, j) - c\ (i - m, j - n)\ |.$$

La somme est effectuée sur tous les indices $(i, j)$ tels que $(i - m, j - n)$ soit un élément de D. On déplace la forme type sur tous les points de la surface et on compte les carrés où l'image et la forme type diffèrent. On doit donc calculer $A\ (m, n)$ pour trouver les positions de la forme type et rechercher celles où $A\ (m, n)$ est faible. On reconnaît la méthode d'adaptation d'un signal à un signal-type : ici, on recherche la portion d'image ressemblant à une image type. Le principe repose donc simplement sur une image type et une fonction indicatrice de similitude.

Il y a diverses fonctions de similitude utilisables, nous en avons donné un exemple ; on aurait pu tout aussi bien prendre :

$$d^2\ (m, n) = \sum_{i,j} (f\ (i, j) - c\ (i - m, j - n))^2$$

qui est la distance euclidienne de deux vecteurs. Examinons plus complètement $d^2\ (m, n)$ :

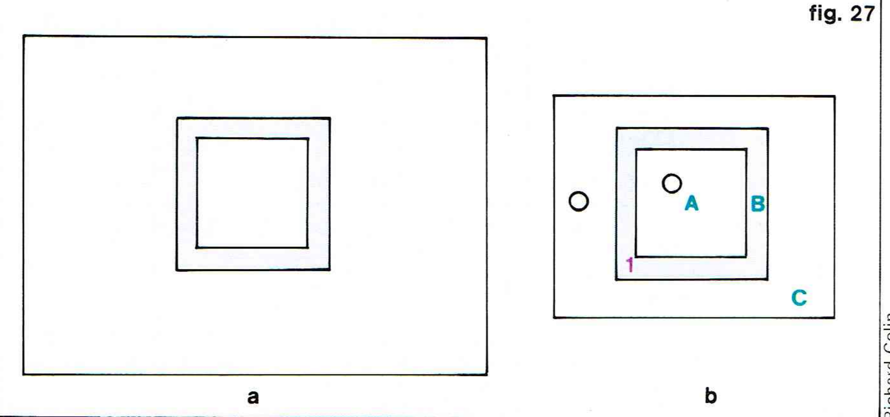
$d^2\ (m, n) =$

$$\sum_i \sum_j (f^2\ (i,j) - 2 f\ (i,j)\ c\ (i-m, j-n) + c^2\ (i-m, j-n))$$

La somme sur les indices $(i, j)$ est effectuée sur le domaine précédemment défini.

$$\sum_i \sum_j c^2\ (i - m, j - n)$$

est constant puisque uniquement lié à la fonction intensité de la forme type, donc indépendant de sa position $m, n$. Par contre, $\sum_i \sum_j f^2\ (i, j)$ est la somme des carrés de la fonction intensité sur l'emplacement testé de la forme type, c'est un terme homogène à une énergie, variant évidemment avec chaque couple de valeurs $(m, n)$. Supposons cette variation assez faible pour qu'on puisse la négliger et considérer $\sum_i \sum_j f^2\ (i, j)$ comme constant. Donc $d^2\ (m, n)$ est faible, c'est-à-dire qu'il y a une grande ressemblance entre la portion d'image et la forme type si le terme :



$$\sum_i \sum_j f\,(i, j)\; c\,(i - m, j - n),$$

est grand. Or ce terme est homogène à une corrélation : la ressemblance est donc grande lorsque la corrélation est forte (voir partie consacrée à l'analyse du signal). On pourrait même, sans se préoccuper de règle de distance, se donner uniquement la corrélation pour avoir une indication entre les deux portions d'image. Rappelons-nous cependant que nous avons fait une hypothèse sur le terme énergétique qui peut se révéler grossière. Pour en tenir compte, on peut calculer une corrélation normée définie par :

$$\frac{\sum_i \sum_j f\,(i, j)\; c\,(i - m, j - n)}{\sqrt{\sum_i \sum_j f\,(i, j)^2}}$$

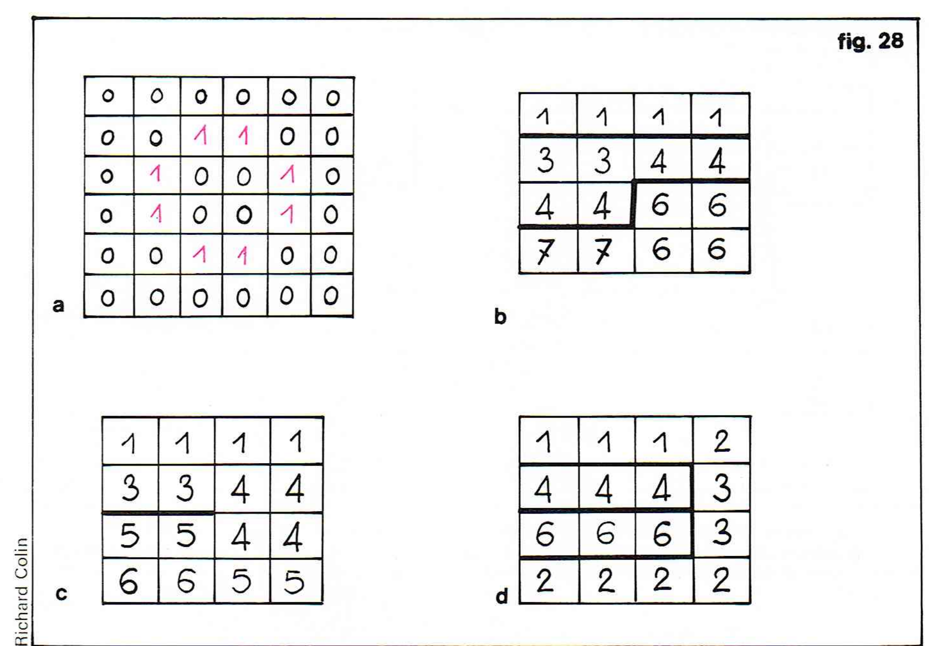
Cette corrélation est maximale lorsque l'accord est parfait (elle ressemble à un coefficient de corrélation). En résumé, lorsque le terme énergétique varie peu, on peut employer directement la corrélation ; dans le cas contraire, il vaut mieux revenir à la notion de distance. Il existe un moyen bien simple pour rendre invariant $\sum_i \sum_j f^2\,(i, j)$ dans le cas d'une image binaire. Il suffit de coder le « blanc » par « 1 » et le « noir » par « — 1 » au lieu de 0 ; en ce cas, quelles que soient les valeurs de $m$ et $n$, $\sum_i \sum_j f^2\,(i, j)$ est constant et égal au nombre de carrés de la forme type.

Ce type de détection apparaît dans un ensemble de problèmes qui semblent différents, mais qui sont en fait équivalents. Le raisonnement a été effectué sur des images binaires, mais il peut être étendu à des images plus riches en informations. On peut remarquer que cette technique ne fait appel qu'à l'information locale de l'image : on ne lit que les fonctions intensité de la portion du plan de l'image correspondant à la forme type. Cet aspect local entraîne une simplicité d'application, mais aussi limite les possibilités.

Nous avons traité du problème de renforcement des arêtes des figures ; nous allons maintenant développer une analyse complémentaire : simplifier une image en la partageant en un **ensemble de zones disjointes.** Ainsi, pour un cas très simple, une zone sera composée de cellules élémentaires pour lesquelles la fonction intensité a des valeurs identiques. Chaque zone est reliée aux autres. Les connexions peuvent être de deux types : ou bien une cellule est reliée aux huit cellules qui l'entourent, ou bien simplement aux quatre qui ont une arête commune. La distinction paraît subtile, et nous allons l'illustrer dans un exemple représenté par l'image binaire de la *figure* 28a. Les cellules élémentaires où $f\,(i, j)$ vaut 1 et qui ont un côté commun sont reliées : la figure est connexe. Si on considère les cellules où $f\,(i, j)$ vaut 0, on s'aperçoit qu'elles sont toutes liées et que le fond « extérieur aux 1 » est lié au fond « intérieur ». Ainsi il semble que nous ayons une figure sans intérieur ni extérieur. En précisant maintenant qu'une cellule ne peut être reliée à une autre que si elle a un côté commun, nous éliminons les liens par les angles. En ce cas, la figure n'est connexe ni par les zones où $f\,(i, j)$ vaut 1 ni par celles où $f\,(i, j)$ vaut 0. Nous sommes pratiquement dans le même embarras que précédemment ! En fait, toutes les difficultés proviennent du choix du quadrillage ; elles n'existeraient pas si on avait pris un découpage en cellules hexagonales, mais ce gain ne compense pas toujours la complexité qu'il induit.

Nous nous limiterons, dans ce qui suit, aux liaisons effectuées par les côtés des cellules élémentaires. On dira qu'un sous-ensemble S de l'image forme une région si :

- toutes les cellules de ce sous-ensemble ont la même valeur de fonction intensité ;
- tout couple de cellules de S est lié par une suite de cellules adjacentes ;
- tout sous-ensemble de l'image contenant S ne vérifie pas les deux propriétés ci-dessus. Par cette dernière propriété, on s'assure que la région définie est la plus grande possible.




▲ ***Figure 28 : problème de la simplification d'une image en la partageant en un ensemble de zones disjointes (voir développement dans le texte).***

Si on applique cette définition à l'image étudiée, on va délimiter un ensemble de zones, chacune correspondant à un ensemble de cellules où $f\,(i, j)$ prend la même valeur. On va donc distinguer les unes des autres aussi bien les zones franchement différentes (faces d'un objet par exemple) que celles qui le sont peu (modifications dues à l'ombre). Il y a deux façons d'éviter ces distinctions.

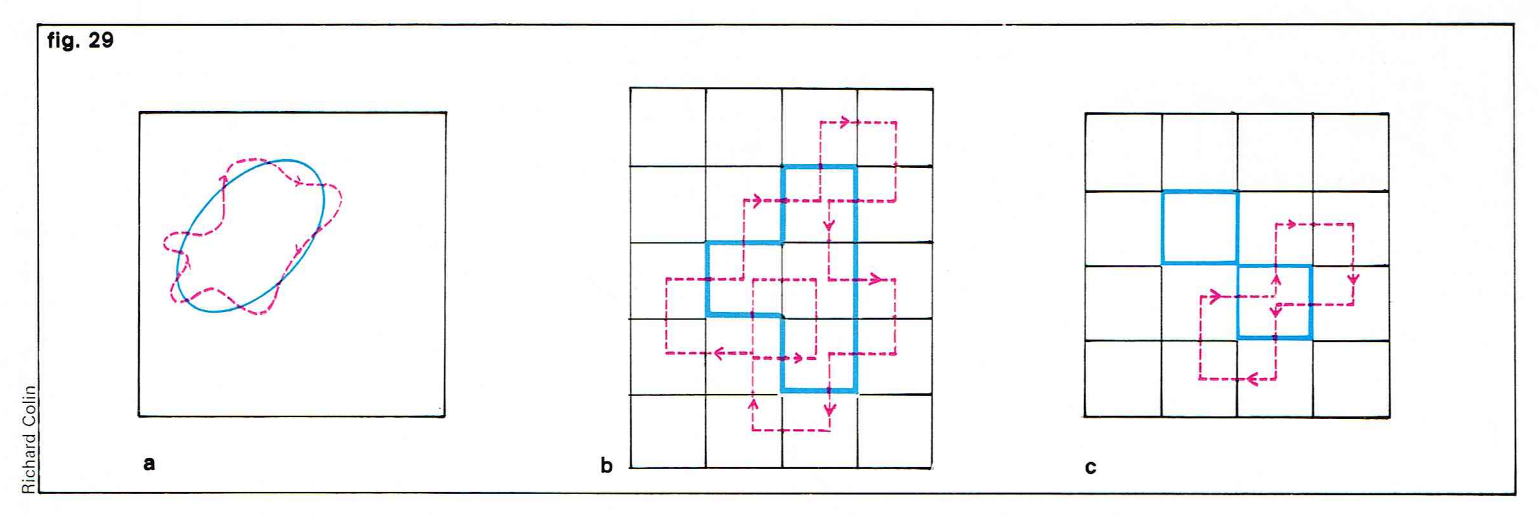
On peut se fixer un seuil et décider de ne pas considérer comme différentes deux régions adjacentes où les fonctions $f\,(i, j)$ diffèrent d'une valeur inférieure à ce seuil : cela permet de regrouper des zones où la différence d'intensité est faible. Un exemple est donné sur la *figure* 28b avec un seuil de 1. La ligne renforcée indique le contour trouvé (les différences de fonction intensité sont supérieures à 1). Cependant, en examinant la *figure* 28c, on constate que cette procédure entraîne parfois le regroupement en mêmes régions de zones où l'intensité est très différente. Aussi une modification de la méthode précédente consiste-t-elle, dans un premier temps, à opérer de la même façon, puis à ne regrouper dans une même région que les zones adjacentes où un critère est satisfait.

Prenons un exemple : on décide de regrouper deux régions adjacentes si la différence moyenne des fonctions intensité des cellules de chacune d'entre elles est inférieure ou égale à 1. Soit la *figure* 28d : les zones où $f\,(i, j)$ vaut respectivement 1, 2, 3 sont regroupées en une seule région ; il apparaît une arête qui sépare la zone des 1 et des 4, puis une autre pour les 4, les 6 et les 2. En fait, le regroupement en régions dépend beaucoup de l'ordre dans lequel sont prises les premières zones définies. Sur la *figure* 28d, on peut très bien arriver à séparer complètement la zone où $f\,(i, j)$ vaut 4 de celle où $f\,(i, j)$ vaut 3.

Au lieu de prendre un critère de séparation fondé sur le noir et blanc, on peut, si l'image le permet, utiliser la couleur comme critère. On se donne une fonction intensité analogue à $f\,(i, j)$, mais qui devra maintenant représenter en plus la couleur : l'ensemble de toutes les couleurs peut être représenté par un vecteur de dimension 3. Pour chaque point $(x, y)$ de l'image, on donne une valeur à un vecteur noté $\mathbf{g}\,(x, y)$ tel que

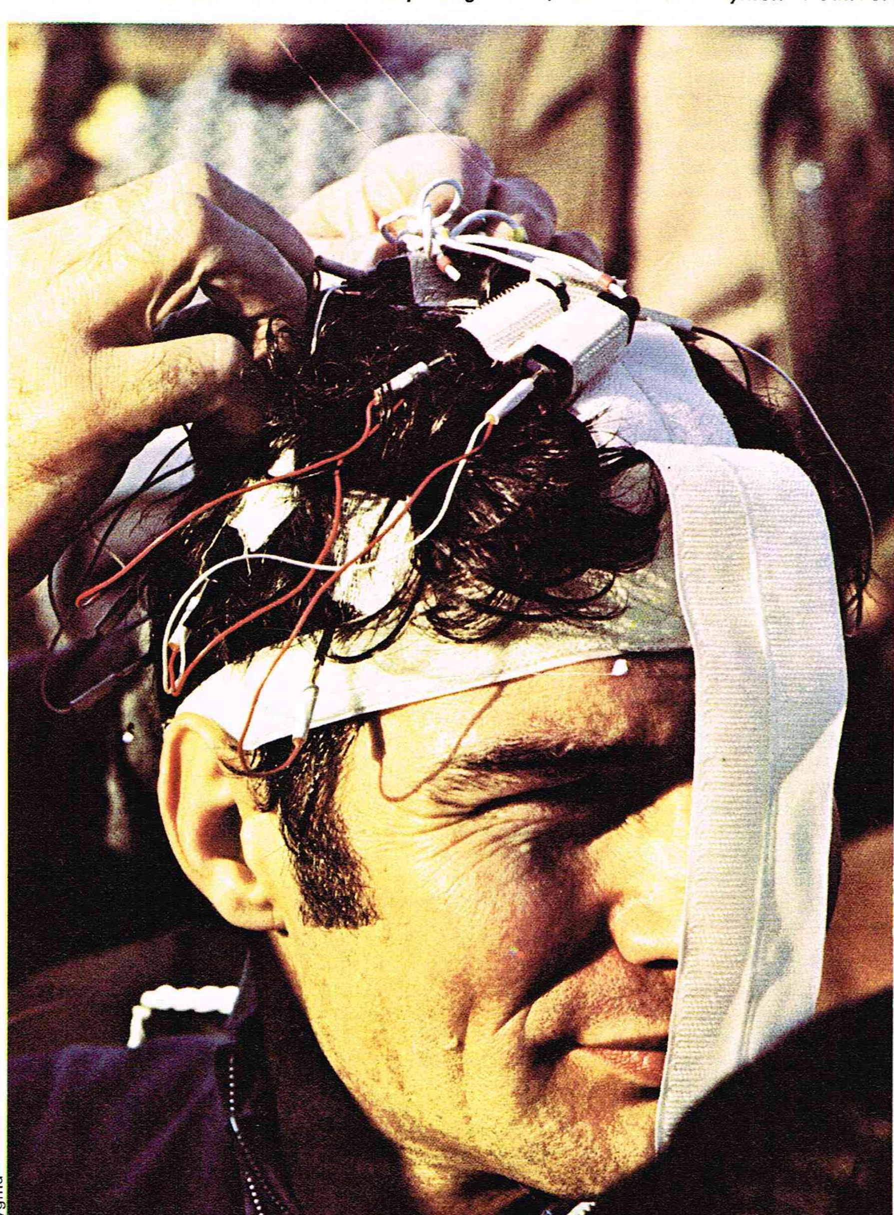
$$\mathbf{g}'\,(x, y) = (g_1\,(x, y),\, g_2\,(x, y),\, g_3\,(x, y))\,;$$

$g_1$, $g_2$, $g_3$ sont les coordonnées, c'est-à-dire les pourcentages des couleurs fondamentales (rouge, bleu, vert). Pour donner les valeurs à $g_1$, $g_2$, $g_3$, il faut donc « filtrer » l'image respectivement dans le rouge, le bleu, le vert. On peut alors chercher à séparer l'image en zones telles que les coordonnées $g_1$, $g_2$ et $g_3$ soient respectivement identiques. Puis on peut regrouper ces zones en régions suivant un critère, qui serait une extension de celui défini pour le noir et blanc. On peut aussi étendre les techniques que nous avons vues, comme le renforcement des arêtes, l'accord avec une forme type, à des images colorées.




▲ *Figure 29 : problème de la simplification d'une image par la mise en évidence de contours ; a, exemple « algorithme de la fourmi » : trajet possible sur l'image ; b, exemple d'approximation du contour recherché dans le cas d'une image binaire ; c, exemple où une zone est oubliée.*

▼ *On a beaucoup cherché à utiliser les méthodes de reconnaissance de formes pour résoudre le problème du diagnostic médical ; un exemple bien connu est celui de l'électroencéphalogramme, réalisé ici sur Raymond Poulidor.*




Nous avons décrit la méthode qui consiste à simplifier une image en effectuant le tracé des contours des objets (technique du gradient). Une autre méthode consiste à suivre les contours, c'est-à-dire la **séparation entre un objet sur l'image et le fond.** Nous allons étudier un cas très simple avec un algorithme facile à mettre en œuvre. Imaginons une fourmi se promenant sur une image jusqu'à rencontrer une partie foncée ; elle incurve alors son chemin sur la gauche jusqu'à quitter cette partie ; elle repart aussitôt sur la droite jusqu'à rencontrer à nouveau la partie foncée. Cette partie foncée est censée représenter la figure dont on veut suivre le contour. Au moment où la fourmi aura rejoint un point proche de son point de départ,le contour sera bouclé. Nous avons imaginé ce processus sur la *figure* 29a.

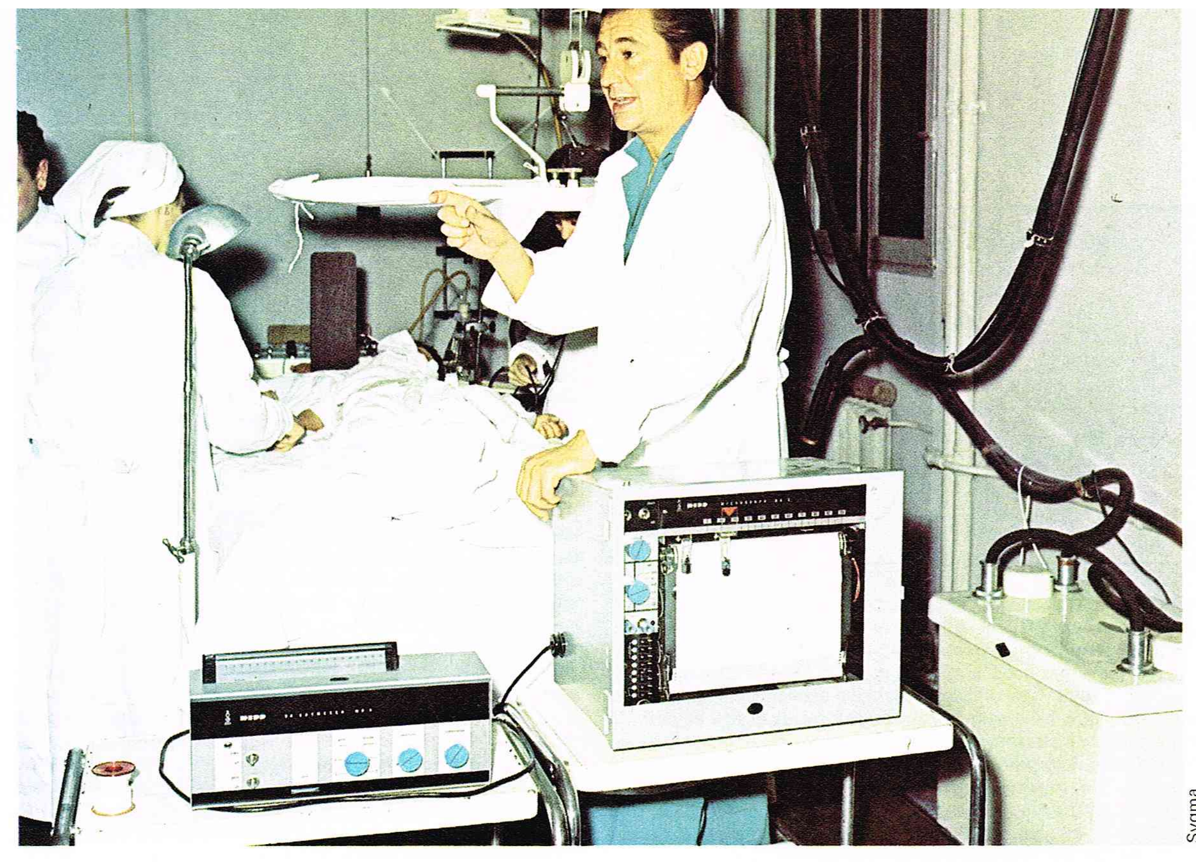
Sans entrer dans tous les détails de mise en place, on peut faire plusieurs remarques sur cet algorithme. D'abord, le rayon de courbure des changements de direction de la fourmi traduit la précision du tracé du contour. Ainsi, les zones « aiguës » par rapport à ce rayon de courbure échapperont complètement à la fourmi. De même, si la figure est « trouée », il peut arriver que la fourmi tombe dans un de ces « trous » proches du contour et perde ainsi complètement la ligne qu'elle suivait.

Simplifions encore l'exposé en prenant le cas d'une image binaire. L'algorithme se précise mieux, et une des objections précédentes n'a plus de raison d'être ; les différents pas de l'algorithme sont les suivants :

* parcourir l'image jusqu'à se trouver dans une cellule de la figure, tourner alors à gauche et rechercher une autre cellule ;
* si la cellule n'est pas une de celles de la figure, tourner à droite et rechercher une autre cellule ;
* arrêter ce tracé itératif quand le dernier point de chute est à moins d'une cellule du point de départ.

La *figure* 29b indique bien une approximation du contour recherché. Cependant la *figure* 29c donne un exemple où la fourmi « oublie » une zone : une cellule est omise, mais nous remarquons qu'elle n'est reliée au reste de la figure que par un angle. On peut noter aussi, en reprenant ce même exemple, que le contour obtenu sera différent suivant la position du point de départ.

En fait, il ne faut pas attacher plus d'importance qu'il n'est nécessaire à cet algorithme simple. Dans le cas d'une image à plus de deux niveaux d'intensité, la détermination de tels algorithmes suppose que plusieurs conditions sont vérifiées. Tout d'abord, il convient de déterminer de quelle figure on veut suivre le contour en se fixant, par exemple, un seuil d'intensité (la différence entre l'intensité de la figure et celle du fond doit dépasser ce seuil). Ensuite, la figure doit être relativement simple ou ne pas présenter de trop grandes variations. Ainsi, même dans une figure binaire, si la boucle d'un 9 n'est pas fermée, on peut être surpris du résultat obtenu par un algorithme chargé d'en suivre le contour (on peut parfois lever des ambiguïtés en effectuant un lissage préalable de l'image). Pour conclure, les algorithmes décrits sont de type série, donc une erreur à une étape se répercute aux étapes suivantes. Ce sont des méthodes tout à fait différentes de celles, par exemple, de la recherche d'accord avec une forme type, qui travaillent de manière parallèle. En fait, on limite



◀ *La surveillance des malades en milieu hospitalier nécessite souvent le contrôle de paramètres importants comme la pression artérielle ou le rythme cardiaque et implique l'utilisation d'appareils enregistreurs, voire même d'ordinateurs.*

Sygma

l'emploi d'un algorithme de contour à des figures nettes et peu marquées par du bruit.

Nous avons présenté, dans ce paragraphe, quelques méthodes élémentaires de traitement d'images. Les techniques employées aujourd'hui sont parfois très complexes (obtention de perspectives, d'ombres...), et ce domaine est en pleine évolution.

## Le diagnostic médical

On a beaucoup cherché à utiliser les méthodes de reconnaissance des formes pour résoudre le problème du diagnostic médical. Les applications sont nombreuses et diverses. En effet, ce domaine correspond parfaitement à ce que nous avons précédemment défini : le médecin examine un ensemble de paramètres et leur associe une maladie. Dans le jargon de la reconnaissance des formes, chaque paramètre est une composante du vecteur forme et chaque maladie une classe ; il s'agit donc d'associer une classe aux valeurs prises par les composantes du vecteur pour un malade donné. Historiquement, les premiers travaux ont été effectués à partir de signaux comme l'électrocardiogramme, le vectocardiogramme et l'électroencéphalogramme : on pouvait en effet disposer immédiatement de valeurs numériques fournies par des capteurs, tandis que pour d'autres données, il n'existe pas toujours de capteurs suffisamment fiables. A l'heure actuelle, si les applications connues en milieu hospitalier sont nombreuses en électrocardiographie ou en électro-encéphalographie, on n'en est pas resté là, et le médecin utilise de plus en plus un matériel sophistiqué qui l'aide à préparer son diagnostic (par exemple, les méthodes de traitement d'images décrites ci-dessus sont utilisées pour le traitement automatique de radiographies pulmonaires).

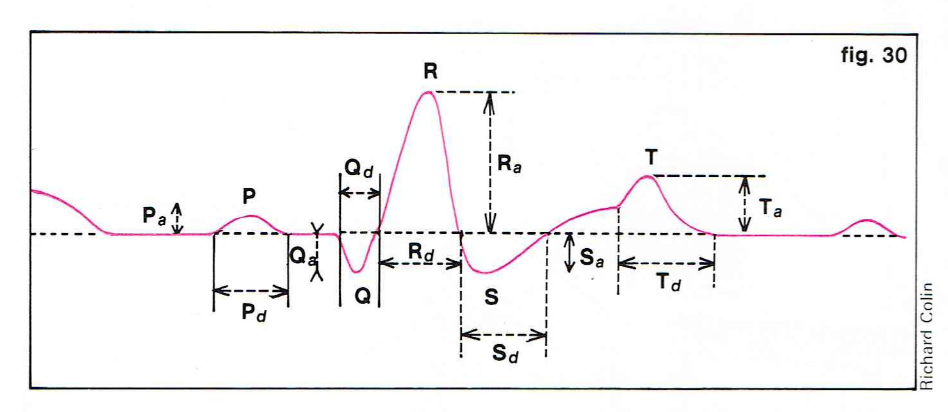
Il faut toutefois s'entendre sur le terme de *diagnostic automatique*. Il ne s'agit en aucun cas de remplacer le médecin et de confier le malade à une machine, non pas tant à cause du problème moral que du problème de sûreté. En effet, actuellement, aucune machine n'est capable d'intégrer toutes les données que le médecin « lit » dans son patient : ce n'est pas le volume qui est en cause (les possibilités de mémoire des ordinateurs sont énormes), mais l'adaptation de l'homme : le médecin, au bout de nombreuses années de pratique, acquiert une connaissance qui lui permet d'associer à certains symptômes observés un cas antérieur et donc de définir facilement un diagnostic. L'ordinateur n'est là qu'à titre d'auxiliaire du médecin ; il lui évite, par exemple, la lecture fastidieuse de tracés électro-encéphalographiques en isolant certains phénomènes, ce qui va accélérer la procédure de détermination. Si le malade nécessite une grande quantité d'examens, l'ordinateur pourra, en associant, par exemple, à certains examens, des fourchettes, proposer plusieurs diagnostics possibles. Le médecin choisira l'un d'eux en fonction de sa propre connaissance, ou les rejettera tous. Insistons donc sur le fait que l'ordinateur n'est pas encore à même de remplacer l'homme dans ce domaine .

Un autre exemple d'emploi de l'ordinateur en milieu hospitalier est le problème de la *surveillance*. Des malades ayant subi une opération importante doivent être surveillés pour un ensemble de paramètres (pression artérielle, rythme cardiaque, etc.). L'ordinateur est à même de surveiller de manière continue plusieurs malades et de donner l'alerte dès que certains paramètres de l'un d'entre eux sortent de zones fixées. Cette surveillance était auparavant effectuée de manière discontinue par un personnel infirmier. L'emploi de l'ordinateur permet ici d'utiliser le personnel à d'autres tâches parfois moins routinières.

Nous pourrions donner l'exemple de nombreuses applications au domaine médical des méthodes exposées ci-dessus. Parce qu'elles intègrent bien les techniques de reconnaissance des formes, nous avons choisi l'**électrocardiographie** et la **vectocardiographie.** En effet, la reconnaissance des formes y a été utilisée et mise en place tôt et avec succès. Cependant, comme il est courant dans de nombreuses applications, les caractères choisis pour la reconnaissance des symptômes n'ont évidemment pas été définis par des mathématiciens, mais sont ceux qu'ont toujours utilisés les médecins. L'exemple que nous allons décrire en détail montre un cas où les méthodes générales appliquées à un problème pratique donnent de bons résultats, à condition d'exploiter l'expérience de nombreuses années de travail humain.

L'électrocardiogramme et sa variante, le vectocardiogramme, qui sont des signaux électriques mesurables sur le corps humain, peuvent fournir des informations sur l'état du cœur. D'un point de vue non médical, ces signaux sont parfaitement adaptés au traitement machine, puisque leur amplitude est assez grande (de l'ordre de 50 mV), la zone de fréquence utilisée assez basse (0-100 Hz), qu'ils peuvent être enregistrés sans être trop marqués par du bruit et que, d'un battement cardiaque à l'autre, ils sont assez reproductibles. Enfin, c'est une technique médicale dont les critères sont suffisamment bien établis pour que les systèmes automatiques mis en place aient un pourcentage de succès assez fort pour des personnes saines ou malades (70 %). Cependant, les cas difficiles échappent en général à ces systèmes automatiques ; aussi ne les considère-t-on, rappelons-le, que comme des aides au diagnostic. Comme c'est souvent le cas en médecine, le signal électrocardiographique ou vectocardiographique peut être utilisé de différentes façons, ce qui change le système de reconnaissance de formes à élaborer.

Dans une première application, une population importante est examinée rapidement. Il peut s'agir soit d'un seul examen, soit d'une étape dans un examen de bilan




▲ *Figure 30 : une période typique du signal électrocardiographique tel qu'il est capté entre deux électrodes sur le torse.*

de santé par exemple. Dans ce cas, la population étant importante, elle ne comporte le plus souvent qu'une faible proportion de malades; la seule décision attendue est : « normal » ou « malade », sans avoir à préciser plus complètement ce dernier point. On choisit donc une règle de décision telle que la probabilité de dire que le patient ne présente aucune anormalité — alors que cela est faux — est faible. Les patients classés « malades » doivent ensuite subir des examens plus poussés qui augmenteront la précision du diagnostic.

L'aide au diagnostic de maladies déterminées est la poursuite de l'application précédente et constitue aussi une deuxième application. Dans ce cas, le malade est examiné plus complètement, soit parce qu'on a le sentiment qu'il présente certains symptômes de maladie, soit parce qu'il demande un bilan plus poussé ou plus localisé. Il faut donc choisir une des maladies possibles; et dans cette application, le pourcentage de patients malades examinés est important, aussi le coût peu élevé et la rapidité qui étaient les caractéristiques de la première application n'ont-ils évidemment aucune utilité. Dans ce cas aussi, et peut-être plus encore que précédemment, la machine fournira une aide au médecin présent. On pense élaborer une règle décisionnelle qui permette de choisir entre toutes les classes (leur nombre varie entre 8 et 13); en fait, étant donné que la décision appartient en dernier ressort au médecin et que celui-ci demandera peut-être d'autres examens complémentaires, la sortie fournie par l'ordinateur sera en général de ce type :

— maladie $i$ avec la probabilité $p_i$
— maladie $j$ avec la probabilité $p_j$, etc.

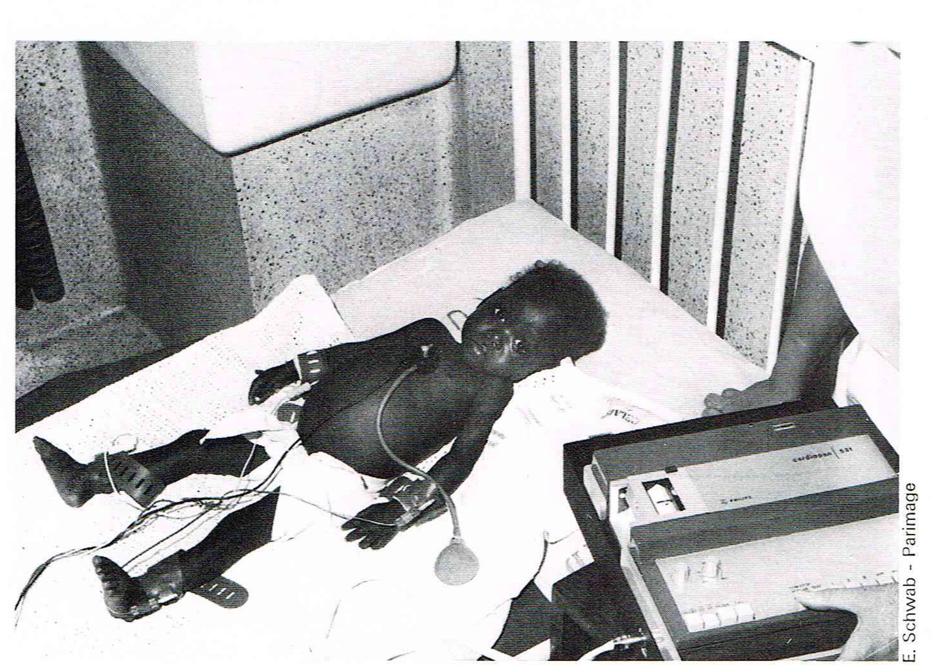
La dernière application que nous allons citer est la **surveillance.** Le patient est affecté d'une maladie qui nécessite un contrôle parfois constant; dans ce cas, il est placé sous un régime hospitalier particulier : tous les traitements antérieurs sont connus, etc. Le but de la surveillance automatique est de déterminer certains changements de rythmes cardiaques annonciateurs d'une éventuelle attaque. La plupart du temps, la sortie fournie par la machine est un signal d'alarme destiné au personnel infirmier ou au médecin de service. Ici encore, comme dans la première application, le signal est : « normal » ou « anormal ». Si la probabilité de dire que le signal est « anormal » alors que c'est faux est élevée, le personnel hospitalier est fréquemment dérangé sans raison. Au contraire, si on dit que le signal est « normal » alors même qu'on est dans la phase qui précède la crise, la conséquence peut être la mort du patient. Le constructeur se trouve donc devant un problème extrêmement délicat. On procède généralement, bien que cela paraisse complètement étranger aux circonstances, en définissant des « coûts » pour chacune des situations précédentes. Toutefois, si la première peut se chiffrer (coût du dérangement d'un médecin pour rien), la seconde revient à donner une valeur finie à la vie humaine.

A l'avenir, les systèmes tels que celui que nous allons décrire vont se généraliser. La reconnaissance des formes verra ses applications grandir dans le domaine médical, mais il n'est pas souhaitable que le contrôle ultime en échappe à l'homme. Nous allons tout d'abord définir le signal électrique recueilli. La *figure* 30 représente une période typique du signal électrocardiographique tel qu'il est capté entre deux électrodes sur le torse. On peut y distinguer plusieurs ondes auxquelles le médecin a donné les noms de P, Q, R, S, T. Il y a plusieurs positions standards pour enregistrer ce signal sur le corps humain, un des plus connus est le système de Frank. Le cœur a pour fonction d'assurer la circulation du sang dans le corps humain. Le sang amené par le système veineux entre dans l'oreillette droite. Commandé par une activité électrique périodique, le muscle de l'oreillette se dépolarise et chasse le sang dans le ventricule droit. Simultanément, l'oreillette gauche reçoit le sang des poumons et l'envoie dans le ventricule gauche. C'est la partie correspondant à l'onde P. La dépolarisation électrique des ventricules correspond au signal complexe Q R S. Cet effet électrique entraîne la contraction des ventricules, et le sang est envoyé du ventricule droit au poumon via l'artère pulmonaire et du ventricule gauche dans le corps via le système artériel. Il peut y avoir repolarisation des ventricules, ce qui se traduit par l'onde T.

Le maximum d'amplitude du signal observé est d'environ 70 mV. Les amplificateurs utilisés pour l'enregistrement du signal ont une fréquence haute de 100 Hz. Pour traitement par un calculateur digital, le signal est échantillonné à une fréquence comprise entre 200 et 500 Hz (respect du théorème de Shannon). Le signal perturbateur, hormis le traditionnel signal de fréquence 50 Hz provenant du réseau, peut être un signal électrique d'origine musculaire si le patient est actif. La précision demandée au nombre binaire résultat de la conversion analogique numérique est faible, et beaucoup d'applications se sont contentées de nombres binaires de sept ou huit chiffres. Mais la détermination de la ligne de base, c'est-à-dire de la ligne de référence par rapport à laquelle sont mesurées les amplitudes des ondes, est délicate (de plus, elle peut évoluer au cours du temps) : aussi les applications actuelles utilisent-elles des convertisseurs standards à dix ou douze chiffres. Nous avons représenté sur la *figure* 30 quelques-uns des paramètres mesurés : amplitudes des ondes P, Q, R, S, T par rapport à une ligne de référence, durée de chaque onde. Il faudrait y ajouter les intervalles : intervalle début onde P-début onde Q, intervalle début onde Q-fin onde T, intervalle entre deux sommets d'ondes R successives, intervalle fin onde S-début onde T.

Lors de la dépolarisation du muscle cardiaque, la distribution des charges électriques à la surface du corps évolue. Une des modélisations utilisées a consisté à décrire ce phénomène par un ensemble de dipôles électriques. Quoi qu'il en soit, ce phénomène a pour conséquence la circulation de microcourants électriques dans le corps humain et donc l'évolution du potentiel électrique à la surface. Cette distribution de potentiel peut être mesurée par des ensembles d'électrodes. Les plus utilisés sont ceux d'Einthoven et de Frank. Dans le premier système, on mesure ce potentiel par des électrodes disposées sur le corps (bras gauche, bras droit, jambe gauche, poitrine). Les connexions sont réalisées en utilisant divers

▼ *Les tracés de l'électrocardiogramme montreront si le cœur de ce jeune enfant du Kenya a été lésé au cours d'une crise de rhumatisme articulaire aigu. D'un point de vue non médical, ces signaux sont parfaitement adaptés au traitement machine puisque leur amplitude est assez grande, leur zone de fréquence assez basse, qu'ils peuvent être enregistrés sans être trop marqués par du bruit et qu'ils sont assez reproductibles.*



points de référence, et douze valeurs de potentiel sont recueillies. En fait, ces douze informations sont redondantes, et on pourrait les simplifier pour les ramener à un noyau moins important.

Définissons maintenant ce qu'on entend par vectocardiogramme. Le vectocardiogramme consiste en l'enregistrement de trois versions enregistrées de façon à former un système orthogonal. Le système d'électrodes est déterminé de façon à saisir au mieux l'activité électrique cardiaque. Pipberger a pu montrer en 1961 que le système de saisie de douze potentiels pouvait en fait être synthétisé par une combinaison linéaire sur une base à trois composantes. C'est ainsi qu'est né l'ensemble d'électrodes dit système de Frank. On enregistre simultanément trois potentiels X, Y, Z [*fig.* 31a et b]. Par la méthode de Lissajous, on peut les tracer les uns en fonction des autres pour donner la variation du vecteur dans le plan XY (frontal), YZ (sagittal) et YZ (transversal) (*fig.* 31c). Cette représentation vectorielle du signal cardiaque apporte beaucoup d'informations; de plus, l'enregistrement simultané des trois signaux permet une réalisation du logiciel et du « hardware » plus simple.

Le problème de la reconnaissance des formes repose sur un bon choix du vecteur représentatif. Nous avons esquissé la difficulté de ce problème (la sélection de caractères), difficulté dont on peut se rendre compte soit par des méthodes heuristiques soit par des méthodes mathématiques. Utiliser la connaissance physique du phénomène est une possibilité intermédiaire. Nous allons ainsi décrire une méthode appliquée au problème qui nous intéresse; elle est fondée sur la théorie électromagnétique des champs, mais elle a un rapport très net avec les méthodes mathématiques directes de sélection de caractères. Il est extrêmement difficile de construire une théorie pour relier à l'activité cardiaque les distributions de potentiel à la surface du corps. D'une part, le cœur n'est pas une simple source électrique isolée. C'est en réalité une distribution de charges variant dans le temps, que l'on peut décrire comme le résultat d'un moment dipolaire distribué dans le volume cardiaque. Une première approximation consiste à approcher ce caractère distribué par une suite discrète de dipôles électriques. Sans entrer dans les détails mathématiques, on peut faire un développement de cette source en une série de dipôles, quadrupôles, multipôles (de manière analogue à un développement en série de puissance).

D'autre part, il existe une seconde difficulté; en effet, même si le cœur est complètement décrit dans son activité électrique, on doit aussi décrire le corps en tant que système de transmission du flux de courants. Or le corps est un volume conducteur linéaire, non homogène, anisotrope et dont les propriétés évoluent au cours du temps! De plus, les valeurs de certains paramètres changent d'un individu à l'autre. Le problème est donc pratiquement insoluble, et on en cherche une approximation en considérant les propriétés électriques du corps comme homogènes et constantes au cours du temps. On le considère donc comme un conducteur linéaire purement résistif aux fréquences utilisées dans cette application. Le problème est amplement simplifié, puisque les distributions de potentiel de surface sont ainsi à chaque instant des fonctions linéaires des sources et ne dépendent donc pas des événements antérieurs. On constitue une source équivalente (modèle cardiaque équivalent) qui donnerait les mêmes distributions de potentiel pour un conducteur homogène et isomorphique. En ce cas, pour un point du corps repéré en coordonnées cylindriques par $(\rho, \theta, \varphi)$ et à l'instant $t$, le potentiel $V(\rho, \theta, \varphi, t)$ s'obtient en appliquant le principe de superposition :

$$V(\rho, \theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{i} [H_{ij}^{a}(\rho, \theta, \varphi)\, a_{ij}(t) + H_{ij}^{b}(\rho, \theta, \varphi)\, b_{ij}(t)]$$

H est homogène à la fonction de transfert reliant le potentiel en un point $(\rho, \theta, \varphi)$ au coefficient du multipôle unitaire : c'est une caractéristique du corps humain. Au contraire, les $a_{ij}$, $b_{ij}$ sont les composantes du signal fournies par le modèle équivalent du cœur, ce sont des fonctions du temps pour tenir compte du fait que ses propriétés ne sont pas constantes. En pratique, on mesure en N points du corps le potentiel et on résout le système de N équations obtenu pour connaître les coefficients. Cependant, il est difficile de relier les propriétés physiques observées à celles d'une source équivalente multipolaire. Aussi Young et Huggins ont-ils proposé en 1962 de partir directement du potentiel $V(\rho, \theta, \varphi, t)$ et de l'exprimer comme un développement sur un ensemble de fonctions orthonormales, les fonctions $\varphi_i(t)$, c'est-à-dire :

$$V(\rho, \theta, \varphi, t) = \sum_{i=1}^{n} a_i(\rho, \theta, \varphi)\, \varphi_i(t)$$

où les fonctions $\varphi_i(t)$ satisfont

$$\int \varphi_i(u)\, \varphi_j(u)\, du = 0 \qquad \text{pour } i \neq j$$

$$\int \varphi_i(u)\, \varphi_j(u)\, du = 1.$$

Prenons N mesures de l'onde cardiaque de durée T : $y_1(t)\, y_2(t) \ldots y_N(t)$. Une méthode pour obtenir les fonctions $\varphi_i(t)$ est de prendre les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de corrélation des mesures. Soit [R] cette matrice, de terme général $R_{ij}$. En supposant que nos mesures $y_i(t)$ satisfont les propriétés d'ergodicité (voir partie consacrée à l'analyse du signal), on a :

$$R_{ij} = E[y_i(t)\, y_j(t)] \rightarrow \int_0^T y_i(u)\, y_j(u)\, du$$

Rappelons qu'on définit le vecteur propre $\mathbf{v}_i$ associé à la valeur propre $\lambda_i$ par $R\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i$. Cette équation traduit le fait que la transformation $R\mathbf{v}_i$ se réduit à une homothétie. On supposera ici que les N valeurs propres $\lambda_1, \ldots \lambda_N$ et les vecteurs propres $\mathbf{v}_i \ldots \mathbf{v}_N$ sont calculés par un algorithme numérique approprié. Convenons de les ranger par ordre décroissant, c'est-à-dire $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \ldots \geqslant \lambda_N$. On construit alors les fonctions $\varphi_i(t)$ par :

$$\varphi_i(t) = \sum_{j=1}^{N} v_{ji}\, y_j(t) = \mathbf{v}_i'\, \mathbf{y}(t)$$

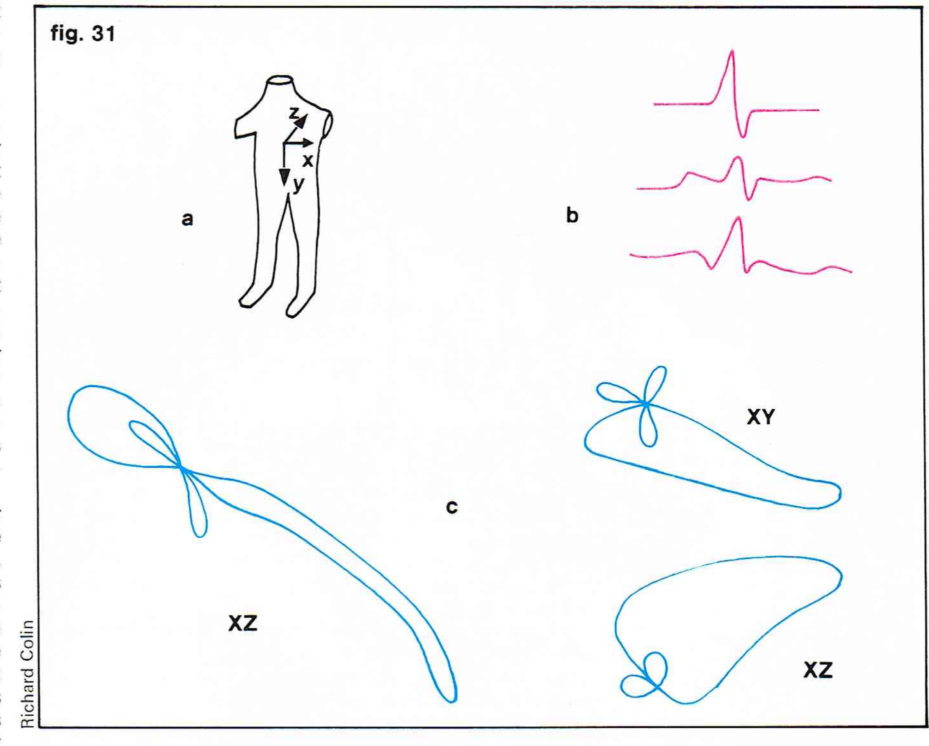
(le signe ' indique l'opération de transposition). On peut montrer que les fonctions ainsi définies sont orthogonales. En effet :

$$\int_0^T \varphi_k(t)\, \varphi_l(t)\, dt =$$

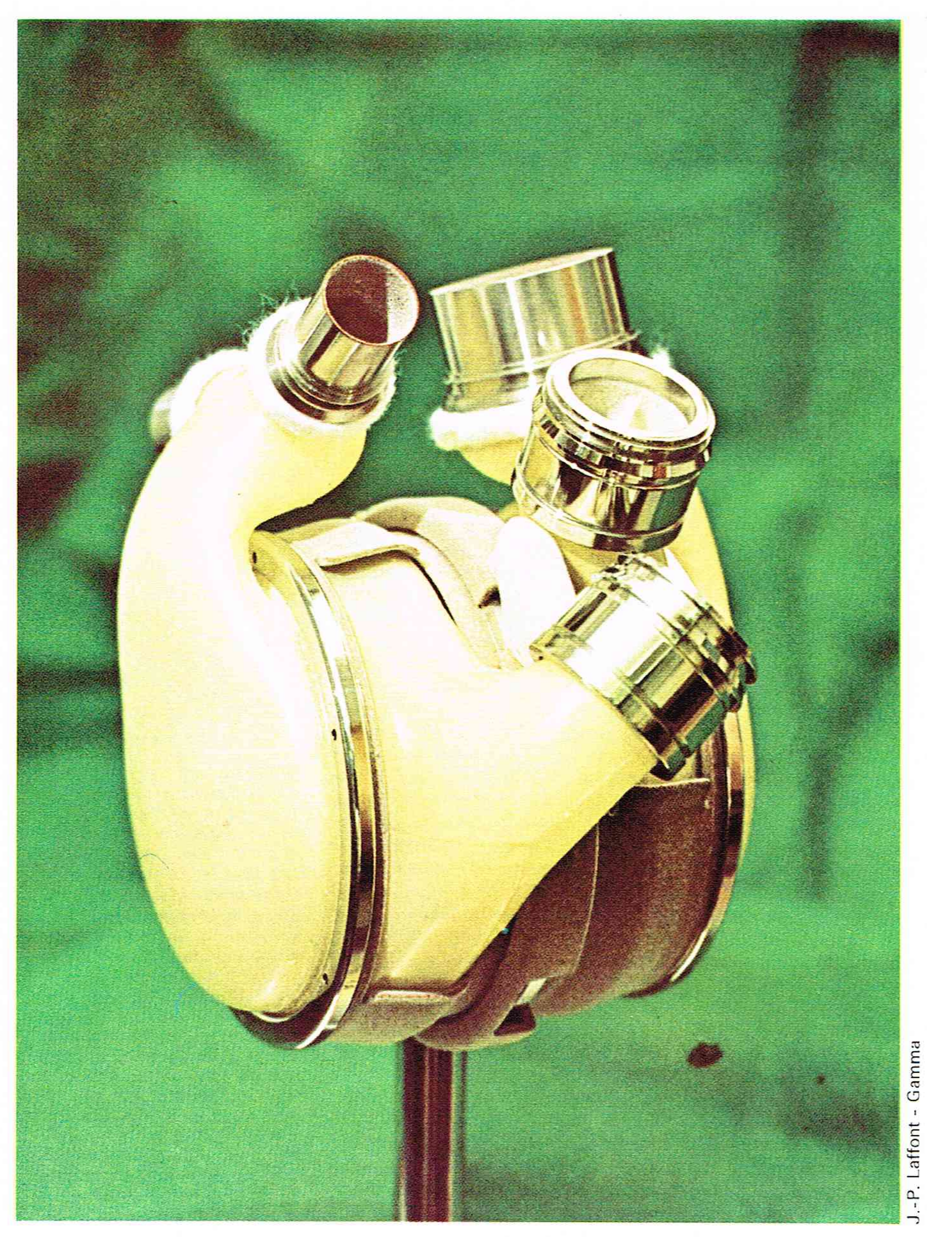
$$= \int_0^T \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, y_j(t)\, v_{ml}\, y_m(t)\, dt$$

$$= \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, v_{ml} \int_0^T y_j(t)\, y_m(t)\, dt$$

$$= \sum_{j=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} v_{jk}\, v_{ml}\, R_{jm}$$




▲ *Figure 31 : principe du vectocardiogramme; a. axes de référence; b, les trois enregistrements; c. tracé des potentiels les uns en fonction des autres dans les différents plans.*



J.-P. Laffont - Gamma

▲ ***Un cœur artificiel.***

Reprenons l'équation définissant vecteurs et valeurs propres :

$$Rv_i = \lambda v_i \Rightarrow \sum_j R_{jm}\, v_{jk} = \lambda_k\, v_{mk}.$$

En multipliant cette équation par $v_{ml}$ et en sommant sur l'indice $m$, on obtient :

$$\int_0^T \varphi_k(t)\, \varphi_l(t)\, dt = \sum_{m=1}^{N} \lambda_k\, v_{mk}\, v_{ml}.$$

Or les vecteurs propres sont par définition orthogonaux. Donc :

$$\sum_{m=1}^{N} v_{mk}\, v_{ml} = 0 \qquad \text{pour } l \neq k.$$

Il y a bien orthogonalité des fonctions $\varphi_i(t)$ construites. Cependant, comme les N points de mesures ne sont pas indépendants, le rang de la matrice n'est pas N, et il y a donc un certain nombre de valeurs propres nulles. Soit $n$ ($\leqslant$ N) le nombre de valeurs propres non nulles [à cause des propriétés de la matrice R, ces valeurs propres sont strictement positives ; elles représentent d'ailleurs le carré de la norme des fonctions $\varphi_i(t)$]. Il n'y aura donc aussi que $n$ fonctions $\varphi_i(t)$, puisque $\varphi_{n+1}(t)$ ... $\varphi_N(t)$ ont des normes nulles. Pour compléter notre fonction-potentiel au point ($\rho$, $\theta$, $\varphi$), il reste à calculer les coefficients $a_i(\rho, \theta, \varphi)$ [à noter que ces coefficients, caractéristiques des propriétés physiques du corps de chaque individu, sont indépendants du temps] ; on les obtient en résolvant :

$$a_i(\rho, \theta, \varphi) = \int_0^T v(\rho, \theta, \varphi, t)\, \varphi_i(t)\, dt.$$

Par cette méthode, l'activité cardiaque électrique peut être décrite à l'aide d'une dizaine de fonctions $\varphi_i(t)$ ; l'avantage est que ces fonctions sont orthogonales entre elles.

Plaçons-nous maintenant dans le cas de la vectocardiographie, où seules trois mesures sont prises. Quand on applique la méthode précédente, on constate qu'on peut ne conserver que deux fonctions $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$. Bien que nous ne soyons pas entrés dans tous les détails mathématiques, théoriques ou numériques, cet exemple montre comment on peut réduire la dimension du vecteur-forme, donc de l'espace d'observation. La méthode exposée (diagonalisation de la matrice de covariance) est analogue à la méthode de statistiques multivariées, appelée analyse en composantes principales. Si le gain paraît faible dans le cas de la vectocardiographie (passage de trois composantes à deux), il devient beaucoup plus intéressant si N est plus grand ; le gain est toutefois ici d'un tiers.

Dans l'exposé général sur la reconnaissance des formes, nous avons évoqué les méthodes permettant de regrouper les vecteurs-formes d'une même classe tout en amplifiant les séparations de classes différentes. Il est difficile de trouver des méthodes linéaires réalisant ces transformations. Dans le cas des vectocardiogrammes, Kelly a proposé en 1971 une méthode permettant d'éliminer les effets parasites, dus au corps humain, sur le vectocardiogramme, ce qui permet de reconcentrer les formes d'une même classe. Le signal électrique cardiaque est transformé de façon supposée linéaire par le corps humain. Cette transformation varie d'un individu à l'autre, de par un ensemble complexe de paramètres : système vasculaire, position exacte du cœur, appareil musculaire, taille et structure des os, capacité pulmonaire, etc. Par suite, des cœurs identiques placés dans des corps différents produisent des vectocardiogrammes différents. Remarquons au passage le problème ardu qui se pose au cardiologue amené à tenir étroitement compte de tous ces paramètres, sans pouvoir les mesurer, pour interpréter le signal visualisé.

Si on pouvait donc réduire, ou même réussir à supprimer l'effet du corps humain sur le signal vectocardiographique, les vecteurs correspondant à une même classe seraient plus liés, et on pourrait employer des algorithmes dits de regroupement (en anglais, « clustering »). Ces algorithmes ont pour but de former des groupes de vecteurs en regroupant les formes apparemment « semblables » suivant un certain critère. Pour qu'ils soient performants, il est bon que tous les « bruits » ou parasites soient éliminés. Soit $\mathbf{y}(t)$ le signal observé sur un patient (ce vecteur a, rappelons-le, trois composantes) et $\mathbf{c}(t)$ le signal cardiaque réel que l'on recueillerait au niveau du corps. Si la transformation est linéaire, il existe une matrice A de dimension 3 × 3 telle que $\mathbf{y}(t) = A\mathbf{c}(t)$, soit, en explicitant :

$$y_1(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{1j}\, c_j(t)$$

$$y_2(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{2j}\, c_j(t)$$

$$y_3(t) = \sum_{j=1}^{3} a_{3j}\, c_j(t).$$

Cette matrice est caractéristique de chaque patient. Pour un ensemble de patients, on observera les vecteurs $\mathbf{y}_1(t)$ $\mathbf{y}_2(t)$, $\mathbf{y}_3(t)$ ... correspondant aux signaux cardiaques $\mathbf{c}_1(t)$, $\mathbf{c}_2(t)$, $\mathbf{c}_3(t)$... avec chacun une matrice de transformation $A_1$, $A_2$, $A_3$... Si notre hypothèse est bonne, les signaux $\mathbf{c}_1(t)$, $\mathbf{c}_2(t)$, $\mathbf{c}_3(t)$ sont, pour une même classe, plus groupés que les signaux $\mathbf{y}_i(t)$, et la séparation entre des classes différentes est plus grande au niveau des $\mathbf{c}_i(t)$ qu'au niveau des $\mathbf{y}_i(t)$.

Cependant, on ne voit pas comment déduire des caractéristiques du torse de chaque individu la matrice $A_i$ qui le caractérise. Puisqu'on ne peut opérer directement, on doit donc avoir recours à des méthodes plus mathéma-

tiques. Une technique simple qui vient à l'esprit est de se donner un « signal type » moyen et de calculer la matrice A par comparaison entre le signal recueilli et le signal modèle (technique analogue à la recherche d'un signal connu dans du bruit). Soit donc un signal type $\mathbf{s}\ (t)$, choisi parce que bien représentatif des signaux qu'on peut recueillir sur une population non malade. Ce signal provient d'une activité cardiaque $\mathbf{c}_s\ (t)$ par l'intermédiaire d'une matrice $A_s$ :

$$\mathbf{s}\ (t) = A_s\, \mathbf{c}_s\ (t).$$

On va chercher une matrice $T_i$ pour l'individu $i$ de manière à transformer le signal recueilli sur lui, $\mathbf{y}_i\ (t)$, en un signal $\mathbf{z}_i\ (t)$ proche du signal type $\mathbf{s}\ (t)$ (à noter ici que la transformation utilisée est linéaire) :

$$\mathbf{z}_i\ (t) = T_i \mathbf{y}_i\ (t)$$

Si $\mathbf{s}\ (t)$ et $\mathbf{y}_i\ (t)$ sont produits par le même signal cardiaque $\mathbf{c}\ (t)$, donc s'ils appartiennent à la même classe, alors la fonction erreur $\varepsilon\ (t)$ définie par :

$$\varepsilon\ (t) = \mathbf{c}_s\ (t) - \mathbf{z}_i\ (t)$$

sera nulle, et :

$$\mathbf{c}_s\ (t) = T_i \mathbf{y}_i\ (t)$$

$$A_s\, \mathbf{c}_s\ (t) = T_i\, A_i\, \mathbf{c}_s\ (t)$$

Donc : $T_i = A_s\, A_i^{-1}$.

Ainsi, la méthode consiste à trouver la transformation qui rapproche le signal $\mathbf{y}_i\ (t)$ d'un signal standard, au lieu de rechercher la transformation due au corps : c'est une opération de normalisation. Remarquons que, dans leur principe, les deux techniques sont équivalentes.

La mise en place nécessite la définition précise de M signaux types $\mathbf{s}_1\ (t) \ldots \mathbf{s}_M\ (t)$, un par catégorie (non malade, malade 1, malade 2, ...). Un signal reçu $\mathbf{y}\ (t)$ est corrélé avec chacun des $s_i\ (t)$, et on retient le $s_i\ (t)$ avec lequel il présente le plus de liens (c'est-à-dire pour lequel la fonction erreur est la plus faible). En fait, les résultats ont montré qu'on obtient le meilleur résultat en définissant un signal modèle unique de la classe des patients non malades et en normalisant tous les signaux recueillis par rapport à ce signal.

Actuellement, on utilise des calculateurs digitaux pour procéder à cette normalisation. Par souci de simplification, la fonction erreur est une fonction quadratique définie par $\int_0^T \varepsilon'\ (u)\ \varepsilon\ (u)\ du$, où T est la période du signal vectocardiographique.

On peut montrer alors que $T_i$ est donné par

$$T_i = \left[\int_0^T \mathbf{c}_s\ (t)\quad (t)\ \mathbf{y}_i dt\right] \left[\int_0^T \mathbf{y}_i'\ (t)\ \mathbf{y}_i\ (t)\ dt\right]^{-1}$$

On reconnaît une quantité homogène à une corrélation normée. La technique de normalisation telle que nous l'avons définie est une technique de corrélation, c'est-à-dire d'adaptation à un signal type (analogue à l'extraction d'un signal connu d'un bruit ou à la recherche d'une figure dans une image).

Dès 1968, cette méthode de normalisation a été appliquée par Brown sur des signaux cliniques au moyen d'un système analogique avec réglage manuel. Les résultats ont montré qu'un cardiologue, auquel étaient soumis les signaux normalisés, donnait des diagnostics identiques à ceux obtenus sur les signaux bruts, et parfois plus rapidement.

En 1966, une étude systématique a été menée par H.V. Pipberger sur la base de données comportant des vectocardiogrammes de sujets normaux et de sujets malades (treize maladies étaient distinguées). En utilisant un signal type issu d'une famille de sujets normaux, vingt éléments de chaque classe ont été normalisés. On a pu constater que la normalisation, bien que l'opération n'utilisât pas un signal standard différent pour chaque classe, renforçait les caractères spécifiques de chaque classe. La normalisation semble donc améliorer les possibilités de classification d'un homme ou d'une machine. L'implémentation par logiciel informatique n'étant pas difficile, ce traitement devrait pouvoir être utilisé systématiquement en milieu hospitalier. Remarquons que le traitement de caractérisation n'est pas terminé avec la normalisation, puisqu'on peut continuer en traitant le signal normalisé de façon à en extraire les caractéristiques principales.

Dans ce court développement, nous avons mis l'accent sur le fait particulièrement important que l'opération de normalisation était menée sur des bases fournies par les principaux utilisateurs, les médecins, ce qui explique peut-être l'excellence des résultats obtenus.

Traitons maintenant un problème un peu différent : celui de la simplification du vecteur-forme obtenu après digitalisation du signal analogique recueilli. En général, on saisit environ quatre ou cinq battements cardiaques, en quatre secondes : ce signal est échantillonné à une fréquence de 500 Hz, soit donc 500 points par seconde. Dans un système à 12 enregistrements en série, chaque enregistrement correspond à 2 000 échantillons, et, au total, nous avons 24 000 points. Pour le vectocardiogramme, chaque composante fournit 2 000 points, et il y a 6 000 échantillons au total. Si l'on se limite à la sélection d'un seul battement cardiaque, cela permet de n'utiliser qu'environ 4 800 échantillons dans le premier cas et 1 200 dans le deuxième. Ces échantillons décrivent complètement la forme, ils sont donc utilisables comme vecteurs-formes en entrée d'un système de reconnaissance des formes. Cependant on constate que l'espace des représentations est alors de dimension soit 4 800 soit 1 200, ce qui exclut évidemment toute visualisation ! D'autre part, certains échantillons amènent peu d'information, comme ceux qui correspondent, par exemple, à l'espace séparant les ondes T et P ; on doit donc pouvoir réduire la dimension de ce vecteur en employant une méthode de sélection de caractères.

Les systèmes implantés en hôpital ont utilisé des caractères mesurés directement sur les ondes, ce qui revient à traduire en version automatique les critères utilisés par les médecins. Plutôt que d'utiliser en effet des critères qu'ils ne peuvent contrôler eux-mêmes, ces derniers préfèrent des mesures où ils retrouvent les méthodes qu'ils ont toujours employées. Il n'y a donc pas eu de tentative purement mathématique de sélection de caractères, il n'y a pas de comparaisons possibles entre les deux approches. Ainsi, les caractères retenus sont les amplitudes des ondes P, Q, R, S, T à des instants bien définis, ainsi que certains intervalles comme indiqué sur la *figure* 47. Pour le vectocardiogramme, on utilise 15 points remarquables pour chaque composante, ce qui donne une représentation par 45 points, à laquelle s'ajoute la durée des ondes QRS, d'où un vecteur à 46 composantes. En 1970, Pipberger, en étudiant des techniques de discrimination entre vectocardiogrammes normaux et pathologiques (donc pour une dichotomie), avait sélectionné au départ 333 valeurs pour chaque mesure. Cet ensemble fut réduit à 30 par un système de sélection. Une technique d'analyse appelée analyse discriminante le réduisit à 14. Soit en effet une discrimination linéaire définie par

$$d\ (\mathbf{x}) = w'\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{30} w_i x_i.$$

On garde alors les 14 valeurs de $x_i$ les plus fortes.

L'ensemble des caractères sélectionné par le U.S. Public Health Service comprenait des mesures d'amplitude ou de durée auxquelles s'ajoutaient le rapport Q/S et le rythme de battement cardiaque, soit un total de 18. Pour le système à 12 enregistrements, on dispose donc de 216 caractères. Pour le vectocardiogramme, des mesures scalaires aussi bien que vectorielles (longueur de vecteurs, angle, etc.) étaient saisies, de même que des caractères comme la surface de la trajectoire QRS. En 1970, Mucciardi et Gose ont fait une étude pratiquement exhaustive des méthodes de sélection de caractères à partir des ensembles de caractères généralement utilisés. Aux 147 caractères de Pipberger ils en ajoutèrent 10 de leur crû. A l'aide de la même banque de données séparées en un ensemble de calcul de discriminateur de taille 247 et un ensemble de test de taille 240 répartis sur neuf classes, ils arrivèrent aux résultats suivants : si on utilise simplement 15 caractères (soit environ un sur dix), on obtient un taux d'erreur de classement de 20 % sur l'ensemble de calcul et de 40 % sur l'ensemble de test. Ce taux décroît assez peu si on ajoute d'autres caractères (de plus, sa décroissance est lente). L'importance de ces résultats est relative, puisque les tailles d'échantillons étaient faibles. Depuis lors, d'autres études ont permis de préciser des tailles « optima » du vecteur-forme pour discriminer



Alain Noguès - Sygma

▲ *Une autre application de l'utilisation de la reconnaissance des formes au diagnostic médical, le densitome ; cet appareil permet de déceler des lésions cérébrales ; la tête de la patiente est introduite dans l'appareil radiographique (à gauche) dont le faisceau de rayons X balaie la boîte crânienne tranche par tranche ; l'image du cerveau est reconstituée sur un écran par l'intermédiaire d'un ordinateur (au milieu) ; des clichés sont réalisés qui permettent l'observation et le diagnostic (à droite).*

certaines maladies. Ces quelques chiffres et exemples ont montré l'importance d'un examen attentif des caractères ; ainsi, une étude scrupuleuse peut réduire de beaucoup la dimension de l'espace d'observation et diminuer de ce fait le coût du traitement tout en augmentant sa rapidité.

Pour conclure cette application au diagnostic médical, il nous reste à décrire les procédures de classification utilisées. Pratiquement, tous les systèmes implantés sur une grande échelle utilisent des critères fournis par les médecins pour chacun des caractères ou paramètres. Le processus de décision est donc mis en place à l'aide de tables de décisions ou d'arbres décisionnels. On pose la question : le paramètre 1 est-il supérieur à une valeur $x_0$ ? Si oui, tester le paramètre 2 ; sinon, tester le paramètre 3 ; on parcourt ainsi un arbre, et le chemin se termine par la détermination d'un ou plusieurs diagnostics. Les critères, c'est-à-dire, par exemple, la valeur $x_0$ ci-dessus, sont fixés grâce à l'expérience des médecins. Des méthodes différentes de celles que nous avons exposées ont été employées, mais seulement au niveau de la recherche : elles n'ont pas encore été utilisées de façon intensive et journalière en hôpital.

La première est celle de Pipberger (1965-1970), fondée sur l'analyse multivariée ; elle a été menée au Research Center of Cardiovascular Data Processing du V. A. Hospital de Washington, qui avait l'avantage de disposer d'une très importante banque de données de vectocardiogrammes : plus de 30 000 enregistrements ; un diagnostic individuel, qui a été souvent vérifié par une autopsie, est attaché à chacun. La classification doit se faire en neuf groupes (un normal et huit malades). On suppose que chaque classe $i$ peut être représentée par une loi de Gauss multidimensionnelle, c'est-à-dire caractérisable par un vecteur moyenne $\mathbf{m}_i$ et une matrice de covariances $R_i$ de dimension $N \times N$ (N est la taille du vecteur-forme $\mathbf{x}$).

On dispose de $N_i$ échantillons par classe et on peut donc estimer pour chacune d'elles les valeurs de $\mathbf{m}_i$ et de $R_i$, $\widehat{\mathbf{m}}_i$ et $\widehat{R}_i$

$$\mathbf{m}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{x}_j$$

$$R_i = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (\mathbf{x}_j - \widehat{\mathbf{m}}_j)' \, (\mathbf{x}_j - \widehat{\mathbf{m}}_j)$$

c'est-à-dire, pour le terme $R_{kl}$ :

$$\widehat{R}_{kl} = \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (x_{jk} - m_{jk}) \, (x_{jl} - m_{jl})$$

$x_{jk}$ est la $k$-ième composante du vecteur $\mathbf{x}_j$,

$x_{jl}$ — $l$-ième — — $\mathbf{x}_j$,

de même

$m_{jk}$ pour $\mathbf{m}_j$

$m_{jl}$ — $\mathbf{m}_j$.

Les critères de décisions sont fondés sur les distances suivantes (distances de Mahalanobis) :

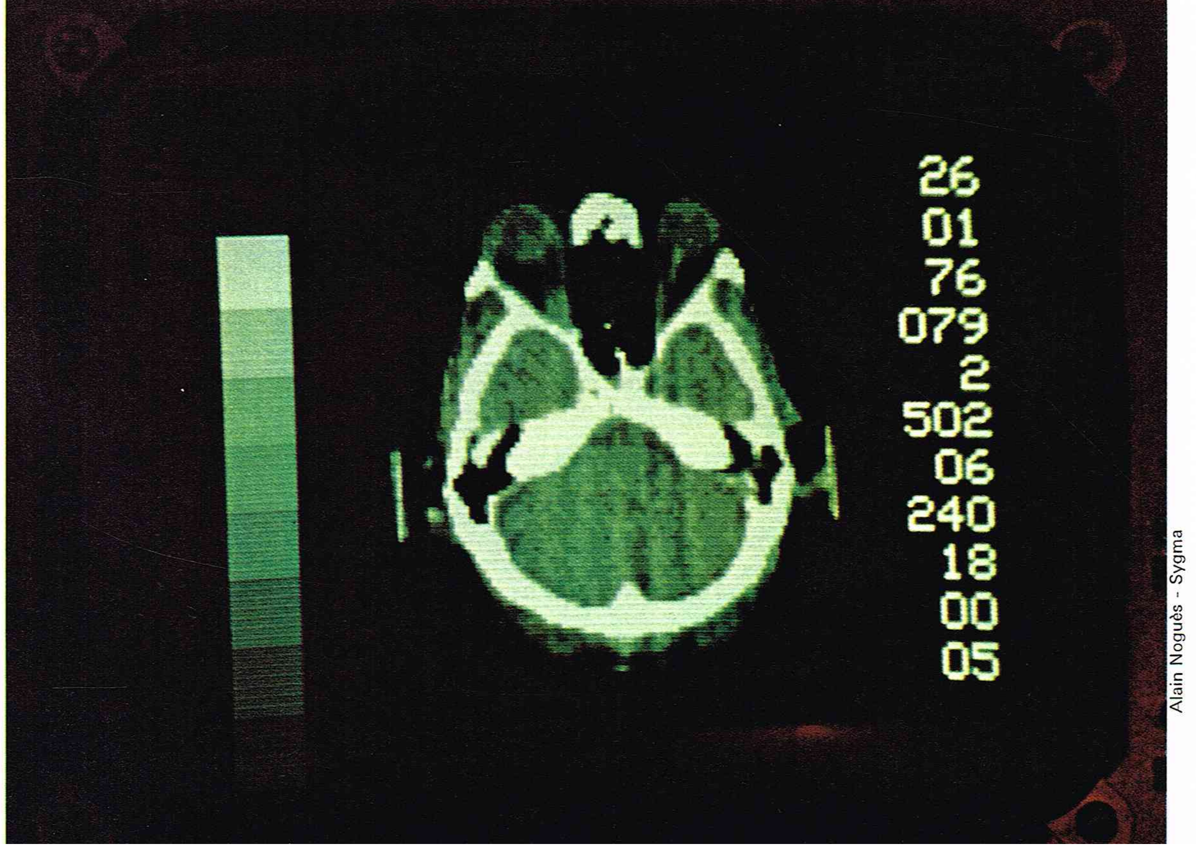
$$D_i(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)' \, R_i^{-1} \, (\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)$$

$D_i(\mathbf{x})$ est l'exposant de l'exponentielle dans l'expression



Alain Noguès - Sygma

Alain Noguès - Sygma




Alain Noguès - Sygma

◀ *Un exemple d'image formée sur l'écran du densitome ; cet appareil, dont la réalisation est due à la Compagnie générale de radiologie, a été installé à l'hôpital de la Pitié à Paris.*



L. Herschtritt - Parimage

▲ *On ne peut pas parler d'intelligence ou d'entendement à propos d'un ordinateur; il n'est en effet pas possible de dire qu'une machine comprend parce qu'elle a su résoudre tel ou tel problème, même ardu, de reconnaissance de formes; elle n'a su que traduire de façon ordonnée des ordres précis, écrits dans un langage spécialement conçu pour elle.*

de la loi de Gauss multidimensionnelle de la classe $i$. $\mathbf{x}$ est classé dans le groupe $i$ si :

$$D_i(\mathbf{x}) > D_j(\mathbf{x}) \qquad \forall j \neq i.$$

Pour minimiser la probabilité de mauvais classement, il a été aussi proposé de travailler sur une fonction :

$$D'_i(\mathbf{x}) = D_i(\mathbf{x}) + d_i$$

où les $d_i$ sont déterminés par programmation linéaire. Pipberger et son équipe ont appliqué cette méthode à des cas très divers en utilisant plusieurs types de caractères. Parmi les neuf diagnostics possibles, seuls les cinq ayant la plus grande probabilité étaient imprimés en sortie de l'ordinateur. On donnait aussi la longueur du vecteur différence entre le vecteur-forme et le vecteur moyenne de chaque classe : les diagnostics donnés en tête correspondent évidemment aux différences les plus faibles. On pourrait croire que l'hypothèse gaussienne prise pour chaque classe est restrictive; en réalité, l'approximation n'est pas mauvaise en cas de distribution unimodale (un seul maximum).

Specht, en 1967, a mis au point une méthode non linéaire de séparation, différente de la précédente parce que non statistique. La fonction discriminante est une fonction polynômiale de $D_i(\mathbf{x})$

$$D(\mathbf{x}) = a_{n+1} + \mathbf{a}'\mathbf{x} + \mathbf{x}'A\mathbf{x} + \ldots$$

Si on se fixe l'ordre du polynôme au départ, il existe des algorithmes permettant d'obtenir les coefficients à partir d'un échantillon type de classement connu. On peut même rendre le problème linéaire en utilisant comme caractères des puissances ou des produits des anciens caractères. La méthode d'obtention des coefficients du polynôme dépasse le cadre de cet exposé : nous ne la développerons pas. Disons simplement qu'on a intérêt à utiliser un ordre du polynôme faible pour minimiser les calculs.

Bien que de nombreux groupes de chercheurs aient travaillé dans ce domaine, les systèmes complètement automatiques mis en place en milieu hospitalier sont encore peu nombreux. Les caractères utilisés pour le vecteur-forme sont toujours déduits des mesures que le médecin effectuait auparavant. Il est à souligner que le médecin a toujours cherché à garder le contrôle de l'organe de classification, au point que certains caractères n'ont jamais été utilisés parce qu'ils ne donnaient pas d'interprétation directe sur le tracé. Les calculateurs utilisés effectuent deux traitements : le premier pour mesurer les différentes amplitudes et intervalles de temps, le second pour effectuer le diagnostic, c'est-à-dire la classification. Cette dernière est généralement obtenue par comparaison de caractères à des valeurs fixées par les médecins.

La sortie proposée au médecin comprend, d'une part, le diagnostic proposé par la machine, d'autre part, les différentes valeurs de caractères, ce qui permet au médecin de confirmer ou d'infirmer ce qui lui a été proposé. Ainsi, le Medical System Development Laboratory of the U. S. Public Health Service a mis au point un système de diagnostic automatique pour électrocardiogramme en 1970. Le système, logiciel et périphérique compris, coûtait environ 70 000 dollars ; il a été implanté dans plusieurs hôpitaux américains. Il existe une version « temps partagé » de ce système, qui permet à plusieurs hôpitaux de se brancher sur un centre. Le signal recueilli est représenté par 216 caractères d'amplitude et de durée (les divers signaux sont échantillonnés durant 3,72 secondes au rythme de 500 échantillons par seconde; il y a douze voies d'enregistrement).

Il existe aussi un système de diagnostic automatique d'électrocardiogramme et vectocardiogramme (système proposé par IBM et la Mayo Clinic à Rochester dans le Minnesota). Le taux d'accord médecin-ordinateur dépasse généralement, pour les différents tests effectués, 80 % (on a même eu des taux de 95 %). C'est l'un des systèmes les plus utilisés de par le monde.

L'électrocardiogramme, puis le vectocardiogramme sont des signaux biologiques à partir desquels on a très tôt tenté de faire des diagnostics automatiques. C'est aussi dans ce domaine que les meilleurs succès ont été obtenus. C'est pour cette raison que nous avons choisi cet exemple, qui permet de mieux se rendre compte, d'une part, des difficultés, d'autre part, des méthodes de résolution choisies en étroite relation avec les utilisateurs, les médecins.

## Conclusion

Nous n'avons pas tenté de décrire toutes les techniques impliquées sous le vocable d'intelligence artificielle. En particulier, si nous avons développé la méthodologie de reconnaissance des formes, nous n'avons rien dit des méthodes de résolution automatique de problèmes. Pourtant, on leur a consacré beaucoup d'attention et on a proposé de nombreuses manières de les résoudre. L'originalité de ce type d'approche réside dans l'extrême diversité, aussi bien des problèmes que des solutions. La reconnaissance des formes que nous avons étudiée en est un bon exemple : pour expliquer la méthodologie employée, on raisonne sur des techniques mathématiques, statistiques... puis, lorsqu'on cherche à explorer le perceptron, on fait appel à des modèles biologiques, et, si on continuait, à la logique formelle (travaux de Hunt). En fait, ce type de problèmes requiert moins des connaissances approfondies dans un certain domaine que de très bonnes notions dans des domaines divers. Effectuer un bon traitement d'images, par exemple, demande des connaissances en filtrage, théorie du bruit, informatique, analyse du signal. C'est pourquoi se sont constituées et se constitueront de plus en plus des équipes pluridisciplinaires attachées à résoudre un projet donné tant soit peu important.

Nous n'avons pas mentionné dans ce court exposé une expression qui fait couler beaucoup d'encre : l'« intelligence » des ordinateurs ou, plus simplement, leur art de comprendre. On ne peut en discuter que sous l'aspect du langage. On ne dit pas qu'une machine comprend parce qu'elle a su résoudre tel ou tel problème, même ardu, de reconnaissance de formes ; en réalité, dans ce cas, elle n'a su que traduire de façon ordonnée des ordres précis, écrits dans un langage spécialement conçu pour ce type de machine : on ne peut vraiment pas parler d'intelligence ou d'entendement. Pour les membres de notre espèce, le langage est la principale source de communication, c'est lui qui nous différencie de manière décisive des animaux. Aussi disposons-nous d'organes spéciaux comme le pharynx et le larynx, dont le contrôle est réservé à certaines zones de notre cerveau et qui n'existent pas chez les espèces animales. Si donc les ordinateurs doivent être utilisés au mieux de nos besoins, ils doivent accepter le seul type de transmission que, non seulement nous connaissons bien, mais encore nous utilisons toujours.

Il est possible — l'avenir tranchera — que l'impossibilité de communiquer avec les machines soit la limite ultime de la révolution actuelle dans le traitement de l'information. Nous ignorons si, actuellement, nous sommes proches ou éloignés de cette limite, si même elle existe — d'ailleurs, si nous en étions proches, nous éviterions peut-être cette discussion... Le traitement de l'information a vraisemblablement encore beaucoup de progrès à faire, donc de beaux jours devant lui. Un rapport du Département d'État chargé de la Défense, aux États-Unis, annonce que, dans les années 1985-90, on devrait pouvoir construire un ordinateur capable de répondre à des ordres énoncés en langage naturel, et ce, pour des problèmes non triviaux. En lisant la conclusion de ce rapport, on peut se demander, d'une part, ce que ses auteurs entendent par problèmes non triviaux, d'autre part, si cette réalisation verra effectivement le jour dans la prochaine décennie. Mais ce ne sont pas là les points qui nous arrêtent : c'est le fait qu'un groupe de personnes, qu'on peut avec raison croire très bien informées, envisagent avec une bonne probabilité que les machines comprennent le langage humain. Bien que certaines prévisions aient été infirmées, il en existe un nombre raisonnable qui se sont révélées fondées.

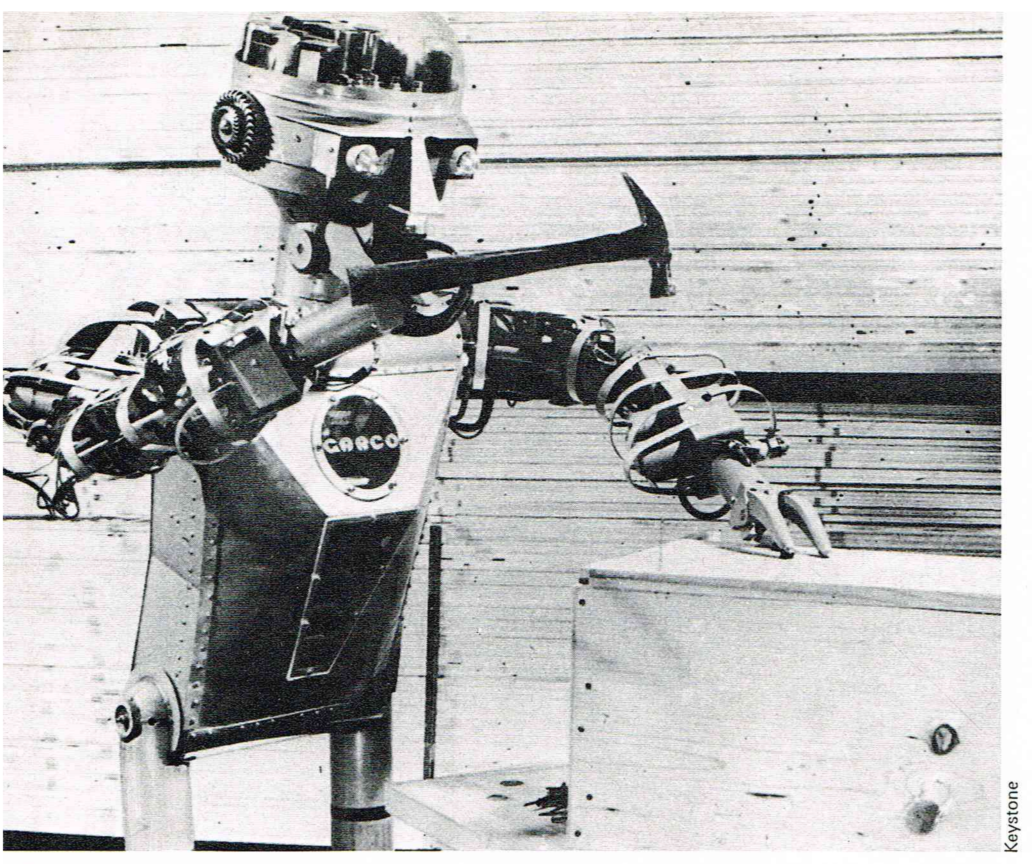
Cet exposé sur les dernières extensions du traitement de l'information a pu aussi décevoir ceux pour qui le terme d'intelligence artificielle avait un aspect un peu « mythique ». En effet, nous avons orienté ce texte, volontairement, vers les algorithmes et parfois vers les traitements mathématiques ; nous n'avons pas donné d'exemples de parties d'échecs jouées par un ordinateur ou de démonstration d'un théorème délicat effectuée par une machine, parce que nous ne voulions pas créer de confusion entre des exemples extrêmement délicats à présenter, d'une part, et les principes des méthodes, d'autre part. Le lecteur aura pu trouver ici les grandes lignes du travail possible en matière de reconnaissance des formes. Un algorithme tel que le perceptron est relativement aisé à comprendre, c'est pourquoi nous avons choisi arbitrairement de le décrire plutôt que de prendre un exemple difficile, qui aurait nécessité des modifications complexes pour être compris. Si nous avions choisi de décrire le programme de jeu d'échecs le plus sophistiqué, nous aurions eu certainement des illustrations plus étonnantes ; mais pour l'expliquer nous aurions dû entrer dans un luxe de détails ; enfin, au moment même de la parution de ce texte, un nouveau programme de jeu aurait été créé et aurait périmé notre description d'une technique en pleine évolution. Aussi avons-nous préféré insister sur l'aspect méthodologique et ne donner des exemples que dans des domaines plus restreints.

Nous ne sommes pas non plus entrés dans des descriptions de robots, organes complexes faisant appel à beaucoup de techniques (intelligence artificielle, donc



J. Drysdale - Parimage - Camera Press

▲ *Une des applications de la reconnaissance d'objets, l'utilisation de robots pour prélever des objets ; ici, le professeur Meredith Thring observe son robot en train de débarrasser une table.*




Keystone

▲ ***Le robot américain construit par Harvey Chapman.***

reconnaissance des formes, traitement d'images, diagnostic automatique, mécanique, etc.) Il existe actuellement, bien sûr, des machines qui effectuent des travaux sous le contrôle de signaux commandés par un ordinateur. L'image captée par une caméra de télévision est interprétée : ainsi le prochain mouvement de la machine est-il décidé. Mais sous ces aspects futuristes, que trouvons-nous ? L' « œil » du robot est une caméra, l'interprétation de la scène relève du traitement d'images, dont les techniques, sinon les buts, sont indépendantes de cette application. Les méthodes de recherche d'objet sont des méthodes de reconnaissance des formes... En fait, le robot, sous son aspect attrayant et même excitant, n'est qu'un des domaines d'application de ce que nous avons appelé l'intelligence artificielle. Le scientifique anglais Lighthill a écrit en 1970 que le fait que la recherche scientifique se soit polarisée sur les robots a pu avoir pour conséquence de faire oublier certains aspects essentiels ; l'image est certainement caricaturale, mais un peu vraie.

Quand on discute d'intelligence artificielle, on peut aussi bien s'occuper uniquement de techniques que se poser des problèmes philosophiques sur les « machines pensantes ». Les philosophes se posent, *grosso modo,* deux types de questions sur l'intelligence artificielle. La première est : Comment la pensée peut-elle être représentée par un organe mécanique ? C'est le problème de la représentation interne symbolique de mots externes ; c'est donc encore une question technique, mais du point de vue philosophique. Ainsi, on désire savoir comment représenter dans un ordinateur le fait qu'une action particulière peut avoir de multiples conséquences. Ce problème est énorme et encore peu exploré étant donné sa complexité.

La seconde question est : Comment une machine pense-t-elle ? Elle a fait couler beaucoup d'encre, entraîné de nombreux débats sans toujours recevoir de réponse claire. On devrait commencer par répondre à la question : Une machine peut-elle penser ? Mais cette question abrupte est justement formulée de façon trop directe et trop imprécise pour recevoir une réponse nette. On a alors essayé de formuler la question ainsi : Quand et comment peut-on décider qu'une machine pense ? La réponse n'est, là encore, pas du tout triviale. Le concept de « pensée » présente d'ailleurs des définitions assez différentes selon les écoles, ce qui ne simplifie pas l'obtention de la réponse, aussi certains philosophes et psychologues préfèrent-ils ne pas utiliser ce terme. Ils souhaitent plutôt rechercher des actions types, représentatives d'un certain formalisme mental que d'autres baptisent « pensée ». En partant de cette définition, la réponse à la question peut s'obtenir à la suite d'un ensemble de tests précis. Les machines peuvent-elles résoudre des problèmes aussi bien que le font les mathématiques ? On répondra : non. Peut-on écrire des programmes tels que les machines sachent résoudre les tests du type des tests d'intelligence (ces problèmes sont en général des problèmes de reconnaissance des formes) ? Oui. Les machines comprennent-elles actuellement le langage humain ? Non, mais peut-être le feront-elles demain. Pour répondre à une question si générale et si vague, il faudrait au moins savoir quels tests sont nécessaires et quels tests sont suffisants pour dire qu'une machine « pense », c'est-à-dire disposer d'une définition précise de ce que l'on appelle « penser ».

On peut d'ailleurs formuler la question différemment : une machine pense-t-elle comme (de la même façon que) un humain ? Il semble qu'un test rapide permette de répondre : si un logiciel a un mode de raisonnement analogue à celui de l'homme, alors ce logiciel doit en être un modèle, argumentation qui a permis de développer beaucoup de recherches sur la simulation. Mais le mode de fonctionnement de la réflexion humaine est fondé sur tout un système physiologique assez mal connu : reconnaître des similitudes de fonctionnement paraît très difficile. De plus un modèle de la réflexion ne peut certainement pas se réduire simplement à un modèle physiologique. D'autre part, un programme peut fort bien imiter l'esprit humain pour résoudre un problème nettement défini et avoir des performances désastreuses pour des problèmes différents ; on ne peut vraiment pas dire, en ce cas, qu'il se comporte comme l'esprit humain. Comme on peut le constater, les questions posées en recouvrent d'autres, et le débat risque d'être sans fin.

Il est généralement admis qu'on peut trouver un comportement intelligent dans des systèmes de traitement de l'information : machines à démontrer des théorèmes, machines d'aides à la décision par exemple. De nombreuses personnalités, qui s'occupent de la science nommée « théorie générale des systèmes », se sont mises d'accord sur un nombre minimal de lois, non évidentes, que l'organisation de tels systèmes doit respecter. Si leurs conclusions sont exactes, la théorie des systèmes doit être applicable aussi bien à la « conception » et à la « fabrication » de machines intelligentes qu'à celles de systèmes biologiques, sociaux ou physiques. Ainsi trouverait-on un lien très étroit entre la théorie et le contrôle des systèmes, d'une part, et le domaine de l'intelligence artificielle, d'autre part. Un problème se ramènerait en fait à un ensemble de six composantes $\{E, C, N, A, S_D, S_I\}$ : E est l'ensemble des situations possibles, C l'ensemble des lois de contrôle applicables à ces situations, N les phénomènes non contrôlés du type bruit, A une application de $E \times C \times N$ dans E, c'est-à-dire d'une situation plus une loi de contrôle plus un phénomène non contrôlé dans une nouvelle situation ; $S_D$ et $S_I$ sont les situations désirées ou autorisées et indésirables. Ce formalisme très général a été appliqué à de multiples situations différentes : ainsi ont surgi des liens entre des situations qui semblaient différentes à l'origine. Ces développements très généraux ont en effet l'avantage d'ignorer les situations particulières et, présentant des résultats globaux, ils permettent de mieux comprendre des problèmes plus spécialisés.

Cette dernière note indique qu'il y a certainement un lien entre la question de l'intelligence artificielle et l'étude ou la théorie des systèmes complexes. Ces deux domaines qui avançaient jusqu'à présent en parallèle vont certainement, dans l'avenir, échanger leurs idées, et leurs théories se servir mutuellement.

En conclusion, bien que nos machines effectuent des calculs de plus en plus difficiles, qu'elles nous aident à prendre nos décisions, elles sont encore loin des possibilités d'adaptation de l'homme, car nous ignorons toujours comment fonctionne le raisonnement humain. En définitive, sur ce plan-là du moins, nous avons fait peu de progrès depuis Descartes !

## BIBLIOGRAPHIE

HUNT E.B., *Artificial Intelligence*, Academic Press, 1975 - DUDA R.O., HART P.E., Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, 1973. - YOUNG, TZAY Y., CALVERT T.W., Classification, Estimation and Pattern Recognition, Elsevier, 1974.